



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**

(27) 1 / 2025

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

Scientific & Technical Journal

Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

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

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

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

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

ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ ЖУРНАЛА:

ВАК:

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

РИНЦ:

- ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

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

Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ**

**2025
Т.27, № 1
Январь - Февраль
ISSN 1998–9903 (Print)
ISSN 2658-5456 (Online)**

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

УЧРЕДИТЕЛИ:

Казанский государственный энергетический университет

ИЗДАТЕЛЬ:

Казанский государственный энергетический университет

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Ахметова И.Г., Stanimir Valtchev, Iliya K. Iliev, Ion V. Ion, Kolcun Michail, Pentiu Radu Dumitru, Андреев В.П., Аракелян Э.К., Борисов В.В., Боруш О.В., Бочкарев И.В., Брякин И.В., Ваньков Ю.В., Вафин Д.Б., Голенищев-Кутузов А.В., Грачева Е.И., Дмитриев А.В., Довгун В.П., Зверева Э.Р., Ившин И.В., Калайда М.Л., Касимов В.А., Козелков О.В., Корнилов В.Ю., Лаптев А.Г., Мещеряков В.Н., Мингалеева Г.Р., Николаева Л.А., Сафин А.Р., Суслов К.В., Федотов А.И., Щинников П.А., Якимов Н.Д.

Свидетельство о регистрации СМИ:

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

Founder: Kazan State Power Engineering University

Publisher: Kazan State Power Engineering University

Editor-in-Chief: EDWARD Yu. ABDULLAZYANOV

Second Editor in Chief: AKHMETOVA IRINA GAREEVNA

Deputy Chief Editor: STANIMIR VALTCHEV

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

Sections:

EDITORIAL BOARD:

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

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

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

Printing House: LLC «FOLIANT»

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

Email: problems_ener@mail.ru

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

СОДЕРЖАНИЕ

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

ДЫК АНЬ НГУЕН, КАШАЕВ Р.С., КОЗЕЛКОВ О.В., АРСЛАНОВ А.Д., ЧАН ВАН ТУНГ. Разработка усовершенствованного программно-аппаратного комплекса управления патрубком анализатора протонного магнитного резонанса ПМРА-IV	3
РАСТВОРОВА И.И., СМЕРНОВ В.А. Исследование работы измерительной микроэлектроники в низкотемпературных климатических условиях	16
БАСЕНКО В.Р. Контроль технического состояния промышленного оборудования по вибрационным параметрам. Проведение динамической балансировки для повышения эффективности работы оборудования	27

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

ПЕТРОВ Т.И., АЛИ Н.К., ПЕТРОВА А.Р., ГИБАДУЛЛИН Р.Р. Сравнение методов Р&О и ANFIS для отслеживания точки максимальной мощности фотоэлектрических модулей в составе электротехнических комплексов	37
КИРИЛЛОВ И.Е., КУЗНЕЦОВ Н.М., ЛАЗАРЕВ Н.И., МОРОЗОВ И.Н. Солнечная энергетика для энергоснабжения удаленных потребителей в Арктической зоне	48

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

ЛАНСБЕРГ А.А., ВИНОГРАДОВ А.В., ПАНФИЛОВ А.А. Физическое моделирование режима обратной трансформации в сельской электрической сети 10/0,4 кВ	59
БАЛОБАНОВ Р.Н., БУЛАТОВ В.М. Анализ влияния режимов работы сухого трансформатора на состояние его изоляции	70

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

ПЛОТНИКОВ Л.В., ОСИПОВ Л.Е., ГРИГОРЬЕВ Н.И., ПОНОМАРЕВ Д.А., ПЛОТНИКОВ О.А. Газодинамика и теплообмен стационарных и пульсирующих потоков воздуха в круглой и треугольной прямолинейных трубопроводах при разной степени турбулентности	88
БАЛЬЗАМОВ Д.С., БРОНСКАЯ В.В. Повышение эффективности использования тепловой энергии на теплотехнологическом участке производства этилена	103
ГИЛЬФАНОВ К.Х., ГАЙНУЛЛИН Р.Н., АХМАДЕЕВ У.М., ГИЛЯЗОВ Д.Р. Интегральные характеристики нестационарного теплового пограничного слоя при сбросе тепловой нагрузки в начальном участке цилиндрического канала	116
ЛАПТЕВА Е.А., АЛАСГАРЛИ С.У.О., КЛОЧКОВА В.А. Поликанальная математическая модель разделения жидких аэрозольных систем в насадочных скрубберах-охладителях	126

CONTENTS

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

NGUYEN DUC ANH, KASHAEV R.S., KOZELKOV O.V., ARSLANOV A.D., TRAN VAN TUNG. Development of an improved software and hardware complex for controlling the pipe of the proton magnetic resonance analyzer PMRA-IV	3
RASTVOROVA I.I., SMIRNOV V.A. Study of the performance of measurement microelectronics in low-temperature climatic conditions	16
BASENKO V.R. Control of the technical condition of industrial equipment by vibration parameters. Carrying out dynamic balancing to increase the efficiency of equipment operation	27

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

PETROV T.I., ALI N.K., PETROVA A.R., GIBADULLIN R.R. Comparison of P&O and ANFIS methods for monitoring the maximum power point of photovoltaic modules in electrical complexes	37
KIRILLOV I.E., KUZNETSOV N.M., LAZAREV N.I., MOROZOV I.N. Solar energy for power supply of remote consumers in the Arctic zone	48

ELECTRIC POWER INDUSTRY

LANSBERG A.A., VINOGRADOV A.V., PANFILOV A.A. Physical modeling of the reverse transformation mode in a rural 0.4/10 kV electric grid	59
BALOBANOV R.N., BULATOVA V.M. Analysis of the influence of operating modes of a dry transformer on the condition of its insulation	70

THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING

PLOTNIKOV L.V., OSIPOV L.E., GRIGORIEV N.I., PONOMAREV D.A., PLOTNIKOV O.A. Gas dynamics and heat transfer of stationary and pulsating air flows in round and triangular straight pipelines at different turbulence degrees.	88
BALZAMOV D.S., BRONSKAYA V.V. Increasing the efficiency of thermal energy use at the thermal technology section of ethylene production	103
GILFANOV K.H., GAINULLIN R.N., AKHMADEEV U.M., GILYAZOV D.R. Integral characteristics of a non-stationary thermal boundary layer at thermal load release in the initial section of a cylindrical channel	116
LAPTEVA E.A., ALASGARLI S.U.O., KLOCHKOVA V.A. Multichannel mathematical model of separation of liquid aerosol systems in packed scrubber-coolers	126

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



УДК 621.31

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-1-3-15

РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ ПАТРУБКОМ АНАЛИЗАТОРА ПРОТОННОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА ПМРА-IV

Дык Ань Нгуен¹, Кашаев Р.С.¹, Козелков О.В.¹, Арсланов А.Д.¹, Чан Ван Тунг²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Ханойский промышленный университет, г. Ханой, Вьетнам
navypro1991@gmail.com

Резюме: **ЦЕЛЬ.** Целью работы является разработка усовершенствованного программно-аппаратного комплекса управления патрубком в мехатронном анализаторе нефти ПМРА-IV. Разработка должна обеспечить точную и стабильную подачу исследуемой жидкости к ПМР-датчику при проведении многофазных анализов свойств нефти. Оборудование должно обеспечивать патрубку плавное перемещение в измерительной емкости, иметь защиту от электромагнитных помех, а также быть компактным и простым в управлении. Управление должно осуществляться с помощью программы на компьютере и пульта управления. **МЕТОД.** Для разработки был исследован принцип работы пробоотборника. По технической документации изучен принцип работы используемого электродвигателя СД-54. Исследован протокол связи между компьютером и микроконтроллером, управляющим электродвигателем. Изучен алгоритм управления для перемещения патрубка. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Результатом работы является разработанное компактное устройство управления патрубком. Созданы: управляющее программное обеспечение для компьютера в среде Labview, пульт управления и схемотехническое решение для увеличения помехозащищенности установки. Обеспечено плавное перемещение патрубка, управляемого с помощью пульта, либо программой на компьютере через USB-соединение. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Сравнение с предыдущими конструкциями показывает, что устройство пробоотбора с новой системой управления работает более точно, стабильно и плавно, а также имеет несколько способов управления. Разработка способна стабильно работать при электромагнитных помехах, возникающих из-за переключений реле или магнитного поля, возникающего вокруг двигателя. Новое устройство управления позволяет быстро и точно отбирать необходимый объем жидкости в датчик ПМР.

Ключевые слова: экспресс-контроль; ПМР-анализатор; исследование жидкости; управление патрубком; протонный магнитный резонанс.

Для цитирования: Дык Ань Нгуен, Кашаев Р.С., Козелков О.В., Арсланов А.Д., Чан Ван Тунг. Разработка усовершенствованного программно-аппаратного комплекса управления патрубком анализатора протонного магнитного резонанса ПМРА-IV // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 1. С. 3-15. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-3-15.

DEVELOPMENT OF AN IMPROVED SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR CONTROLLING THE PIPE OF THE PROTON MAGNETIC RESONANCE ANALYZER PMRA-IV

Nguyen Duc Anh¹, Kashaev R.S.¹, Kozelkov O.V.¹, Arslanov A.D.¹, Tran Van Tung²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Hanoi University of Industry, Hanoi, Vietnam

navypro1991@gmail.com

Abstract: *THE PURPOSE.* The aim of the work is to develop an improved software and hardware complex for controlling the nozzle in the mechatronic oil analyzer PMRA-IV. The development should provide an accurate and stable supply of the test liquid to the PMR sensor when conducting multiphase analyzes of oil properties. The equipment must provide smooth movement of the nozzle in the measuring tank, be protected from electromagnetic interference, and also be compact and easy to operate. Control must be carried out using a program on a computer and a control panel. *METHOD.* For development, the operating principle of the sampler was investigated. Based on the technical documentation, the operating principle of the used SD-54 electric motor was studied. The communication protocol between the computer and the microcontroller that controls the electric motor has been studied. A control algorithm for moving the pipe has been studied. *RESULTS.* The result of the work is a developed compact pipe control device. Created: control software for a computer in the Labview environment, a control panel and a circuit solution to increase the noise immunity of the installation. Smooth movement of the pipe is provided using a remote control or a program on a computer via a USB connection. *CONCLUSION.* Comparison with previous designs shows that the sampling device with the new control system is more accurate, stable and smooth, and has multiple control methods. The development is capable of operating stably in the presence of electromagnetic interference arising from relay switching or the magnetic field arising around the motor. The new control device allows you to quickly and accurately select the required volume of liquid into the PMR sensor.

Keywords: *express-control; PMR-analyzer; liquid control; nozzle control; proton magnetic resonance.*

For citation: Nguyen Duc Anh, Kashaev R.S., Kozelkov O.V., Arslanov A.D., Tran Van Tung. Development of an improved software and hardware complex for controlling the pipe of the proton magnetic resonance analyzer PMRA-IV. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (1): 3-15. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-3-15.

Введение (Introduction)

Современным требованием нефтяной промышленности является формирование интеллектуальных цифровых нефтяных месторождений с возможностью экспресс-контроля таких свойств компонентов многофазного потока нефтяных дисперсных систем [1] как: скорости компонентов многофазного потока, концентрации воды, нефти, газа и асфальтено смол [2-4]. В [4, 5] указывается, что работникам нефтяной промышленности необходимы аппаратно-программные комплексы и экспресс-методы для определения свойств сырой нефти в процессах добычи и подготовки нефти, а также для решения задач, требующих исследовать её параметры. Распоряжение Правительства Российской Федерации №1632 «Создание экосистемы цифровой экономики по основным направлениям: новые технологии производства и компоненты робототехники» стимулировало усилия ученых по разработке импортозамещающих приборов и технологий в данном направлении.

В настоящее время требования к методам оперативного контроля стали более высокими. Среди них, например, высокая точность измерений (погрешность не должна превышать 1,5%) и универсальность (метод должен быть применим для исследования большого разнообразия видов нефти). Однако есть еще один критерий, и в большинстве случаев он становится первичным. Исследование методом экспресс-контроля не должно изменять химический состав и физическую структуру исследуемой среды. Это необходимо для получения подтвержденных данных о выявленных отклонениях в образце, что как правило возможно, при проверке качества продукции с использованием спектрометров высокого разрешения (например, многофункциональных рентгеновских, оптических и т. д.). Однако эти приборы устанавливаются в стационарных лабораториях (на значительном

расстоянии от места проведения экспресс-контроля). Кроме того, это дорогостоящее оборудование, требующее особых условий эксплуатации и довольно затратное в обслуживании [6].

Прибором, отвечающим современным техническим требованиям по доступной цене и удобным в эксплуатации, является разработанный на кафедре «Приборостроение и мехатроника» в Казанском Государственном Энергетическом Университете проточный анализатор нефти ПМРА-IV. Однако последние испытания установки показали, что скорость потока жидкости через ПМР-датчик устройства нестабильна из-за работы системы пробоотбора. Это приводит к тому, что количество пробы жидкости, поступающей в датчик, невозможно отрегулировать с необходимой точностью. На основе описанной проблемы определяется цель исследования.

Целью исследования является разработка усовершенствованного устройства управления патрубком пробоотборника в проточном экспресс-анализаторе нефти ПМРА-IV. Усовершенствованное оборудование должно быть компактным по размерам, простым в управлении, обеспечивать плавное перемещение патрубка в пробоотборнике анализатора и иметь защиту от электромагнитных помех, возникающих при работе установки.

Научная значимость исследования заключается в разработке нового алгоритма управления, который позволяет плавно регулировать положение патрубка в системе пробоотбора. Алгоритм основан на управлении направлением вращения однофазного синхронного электродвигателя типа СД-54 и контроле фактического положения патрубка с помощью недорогого микроконтроллера (МК), а также самостоятельно разработанного программного обеспечения (ПО) на основе языка G в среде LabVIEW.

Практическая значимость исследования заключается в разработке устройства управления с недорогими комплектующими для уменьшения затрат производства. Обеспечение плавного управления патрубком пробоотборника ПМРА-IV и повышение точности измерений для соответствия современным технологическим требованиям.

Литературный обзор (Literature Review)

В публикациях [10-14] представлена идея мехатронного технологического устройства для экспресс-контроля параметров сырой нефти на базе протонной магнитно-резонансной (далее ПМР) релаксометрии. В период 2021–2022 годов на кафедре "Приборостроение и мехатроника" Казанского Государственного Энергетического Университета по этим идеям был создан программно-электромеханический комплекс оборудования (АРС-III) [16, 17] для экспресс-контроля сырой нефти. В этом оборудовании количество пробы поступает на ЯМР-датчик за счет разницы давлений потока между трубой и патрубком. Это значит, что процесс пробоотбора не поддается контролю и полностью зависит от потока.

В работе [13] автор Кашаев Р.С. с коллегами представили комплекс мехатронных устройств для анализа жидкостей ПМРА-IV. Устройство для пробоотбора управляется электронной платой *Atmel STK500*. Это устаревшая плата с большими габаритами и микроконтроллером неактуальным на рынке, где управление зависит от предустановленной программы, которую невозможно открыто редактировать.

Примечательной особенностью названных устройств является то, что забор образцов осуществляется путем оперативного отбора сырой нефти из небольших участков трубопровода в проточном режиме, где скорость пробоотбора нельзя регулировать. Следовательно, объем исследуемой жидкости, поступающей на ПМР-датчик, в разное время неодинаков, что приводит к неточным результатам. Кроме того, патрубок устройства для пробоотбора можно поднимать (опускать) только до конца хода.

На основе анализа представленных исследований показано, что разработка программно-аппаратных устройств для управления патрубком пробоотборника является важной задачей. Это имеет значение не только для усовершенствования комплекса анализа жидкостей ПМРА-IV, но и для аналогичного оборудования, которое может быть разработано в будущем.

Материалы и методы (Materials and methods)

К настоящему времени коллективом авторов была разработана 4-я версия ПМР-анализатора ПМРА-IV [11, 12] (рис. 1). Метод импульсного ядерного магнитного резонанса (далее ЯМР) [7, 8], используемый в ПМРА-IV, обладает большими, еще не раскрытыми в полной мере возможностями для экспресс-анализа характеристик водонефтяных эмульсий. Определение характеристик нефтяных проб с использованием методов ЯМР является обширной научной тематикой [9]. Экспресс-методы контроля нефти – это одна из ключевых тем исследований в нефтяной инженерии, и ЯМР – анализ является наиболее перспективной технологией, способной решить поставленные задачи данного направления. Широкие возможности ядерной (протонной) магнитно-резонансной релаксометрии (далее ПМРР) для

определения параметров нефтей были продемонстрированы в публикации [10], и было установлено, что ПМРР уникален для экспресс-контроля эмульсий.

Структурно-функциональная схема проточного мехатронного анализатора жидкости ПМРА-IV включает: 1 – измерительная емкость, 2 – патрубок, 3 – магнит для предварительного намагничивания жидкости, 4 – измерительная РЧ-катушка, 5 – измерительный магнит, 6 – электропривод, 7 – система управления патрубком, 8 – манометр, 9 – термометр, 10 – электронный блок релаксометра ПМР, 11 – плата *Atmel STK500*, 12 – емкость для слива измеренной жидкости, 13 – ноутбук, 14 – выносной пульт управления анализатором.

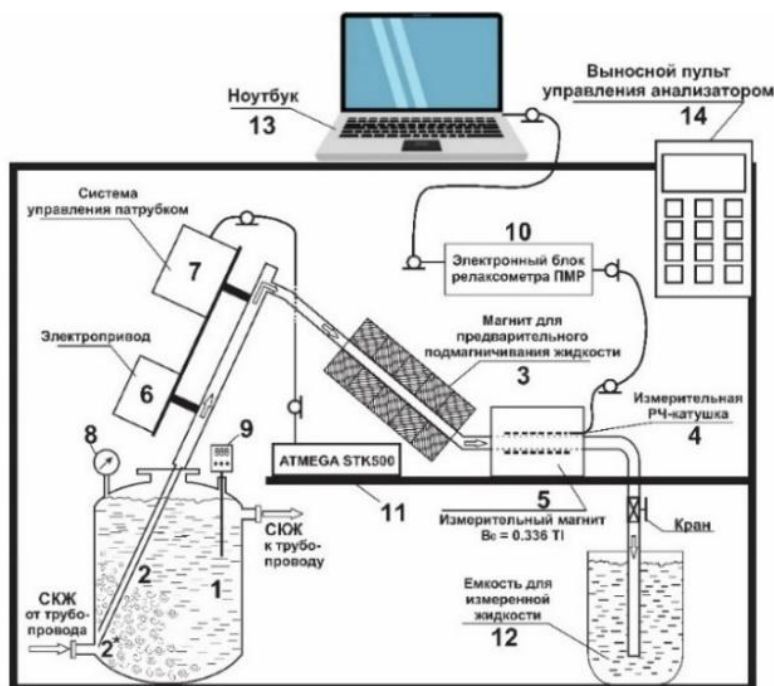


Рис. 1. Структурно-функциональная схема проточного мехатронного анализатора жидкости ПМРА-IV

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

Устройство, используемое для перемещения пробы жидкости из емкости к датчику ПМР-релаксометра под действием перепада давления ($P_{тр} - P_{п}$) между трубопроводом и патрубком основан на уравнении Бернулли [13-15], согласно которому при непрерывном течении изменение давления P_i в различных сечениях S мерника для скорости потока v_i описывается уравнением:

$$\frac{P_i}{\rho} + \frac{v_i^2}{2g} = \text{const}$$

Если расход $Q_i = S_i \cdot v_i$ постоянен, то давления P_1 и P_2 в разных сечениях S_1 и S_2 трубы будут связаны уравнением:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{\text{const}}{S_1^2} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{\text{const}}{S_2^2}$$

Устройство пробоотбора представляет собой комбинацию мехатроники, управляемую с помощью микроконтроллера (рис. 2).

Механическая часть устройства установлена на алюминиевой опоре, на монтажном кронштейне привода с патрубком. Привод позволяет патрубку перемещаться в измерительной емкости тем самым создавая перепад давлений жидкости в трубопроводе и патрубке. Привод выполнен на базе однофазного синхронного электродвигателя СД-54 (3). Дифференциальные шестерни (7) передают движение вала двигателя на приводной вал ходового винта (9) через штифт (8), установленный на приводном валу, который преобразует вращение ходового винта в возвратно-поступательное движение (вперед – назад, представлено на рисунке 2 или вверх – вниз, представлено на рисунке 1). Шатун (11) соединяет патрубок со штифтом на ходовом винте, позволяя перемещать патрубок соответственно смещению штифта. Энкодер (10) является дополнительным устройством для усовершенствованного оборудования, установленным на конце ходового винта для

определения расстояния перемещения патрубка. Энкодер (10) состоит из тонкого медного диска с 25 равномерно расположенными прорезями и 1-канального оптического приемопередатчика.

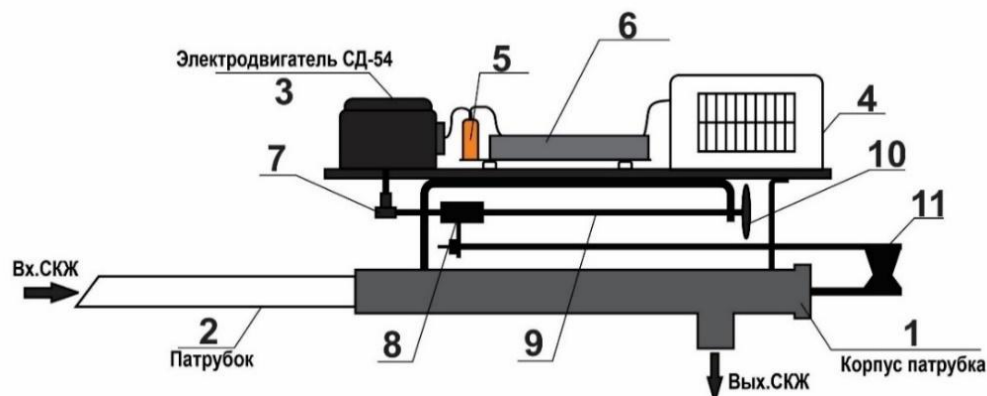


Рис. 2. Структурно-функциональная схема устройства управления патрубком: 1 – корпус патрубка, 2 – патрубок, 3 – электродвигатель СД-54, 4 – блок преобразователя питания, 5 – возбуждающий конденсатор, 6 – Интегральная плата драйвера управления двигателем, 7 – дифференциальные шестерни, 8 – штифт, 9 – ходовой винт, 10 – энкодер, 11 – шатун

Fig. 2. Structural and functional diagram of the pipe control device: 1 – branch nozzle housing, 2 – branch nozzle, 3 – SD-54 electric motor, 4 – power converter unit, 5 – exciting capacitor, 6 – Integrated motor control driver board, 7 – differential gears, 8 – stick, 9 – way screw, 10 – encoder, 11 – connecting rod

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

Часть управляющего устройства расположена на плате Atmel STK500 (рис. 3). Плата имеет разъемы, позволяющие использовать 8-контактные, 20-контактные, 28-контактные и 40-контактные микроконтроллеры семейства AVR. В существующей конструкции используется микроконтроллер ATmega 8515 в корпусе типа DIP-40. Плата Atmel STK500 содержит кнопки и разъемы для подключения периферийных устройств. Она имеет возможность связываться с компьютером через интерфейс RS232.



Рис. 1. Плата Atmel STK500

Fig. 3. Atmel STK500 board

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

Плата Atmel STK500 имеет большой размер, использует микроконтроллер старой версии (ATmega 8515), имеет низкую скорость передачи данных по протоколу RS232, что приводит к техническим ограничениям проточного мехатронного анализатора жидкости ПМРА-IV.

Для приведения в действие патрубка используется электродвигатель типа СД-54 (рис. 4.а). Этот тип конденсаторного синхронного реактивного двигателя с короткозамкнутым ротором используется во многих областях науки и техники. Двигатель оснащен коробкой редуктора с передаточным числом 25/1 для достижения конечной скорости вращения 60 об/мин. Двигатель может быть подключен к источнику питания 127 В

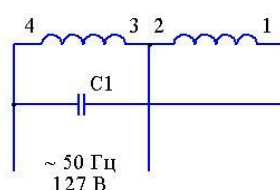
50 Гц или 220 В 50 Гц. В соответствии с используемым источником питания будут использоваться разные схемы подключения (рис. 4.б и 4.в), где 1, 2 – контакты катушки возбуждения, 3, 4 – контакты катушки управления. Конденсаторы также подключены к катушкам как для возбуждения, так и для управления направлением вращения двигателя. Таким образом, просто изменяя параметры, тока, емкости и индуктивности в цепи можно управлять двигателем для изменения скорости или направления вращения.

В нашей работе мы выбрали схему, показанную на рисунке 4.в, для подключения двигателя к источнику питания 220В/50Гц и управления направлением вращения двигателя путем изменения положения конденсаторов $C1$ и $C2$ друг относительно друга. Двигатель будет вращаться вперед, если конденсатор $C1$ подключен к контактам катушки управления (контакты 3, 4), и двигатель будет вращаться назад, если к контактам 3, 4 катушки управления подключен конденсатор $C2$. Переключения производятся с помощью реле [18].



(а)

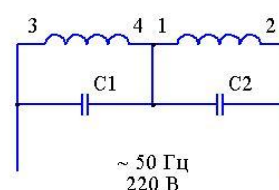
Схема включения двигателя на 127 В, 50 Гц



$C1$ - МБГТ-300В-1мкФ±10%

(б)

Схема включения двигателя на 220 В, 50 Гц



$C1$ - МБГЧ-1-2А-250-0,5±10%
 $C2$ - МБГЧ-1-2А-250-2,0±10%

(в)

Рис. 4. Однофазный синхронный электродвигатель типа СД-54 (а) и схемы подключения двигателя к питаниям (б), (в) Fig. 4. Single-phase synchronous electric motor type SD-54 (a) and the motor connection diagram to the power supply (b), (c)

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

На рисунке 5 показана функциональная схема системы управления патрубком усовершенствованного пробоотборника для анализатора ПМРА-IV. Команда для управления подъемом (опусканием) патрубка подается на микроконтроллер с пульта управления или ноутбука, МК создает сигналы управления двигателем СД-54 через драйвер. Затем двигатель работает таким образом, чтобы обеспечить перемещение патрубка вверх или вниз. Направление перемещения патрубка зависит от направления вращения двигателя. Данные о перемещении патрубка передаются обратно в МК по цепям обратной связи и отображаются на ЖК-дисплее пульта или интерфейсе ПО на компьютере.

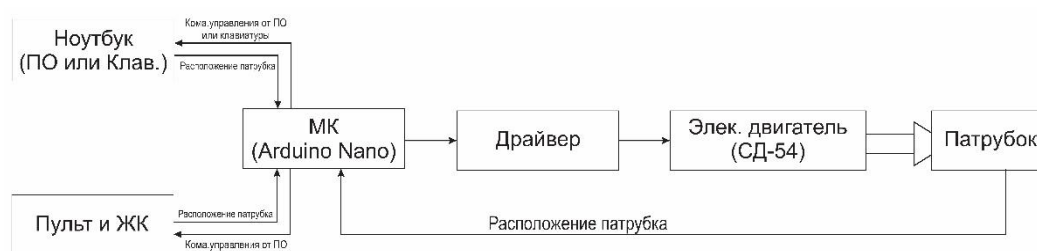


Рис. 5. Функциональная схема системы управления патрубком Fig. 5. Functional diagram of the nozzle control system

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

Для управления устройством с компьютера используется шина данных USB. Она состоит из четырёх линий: двух проводников питания и двух проводников данных в витой паре. С помощью кабелей формируется интерфейс между USB-устройствами и USB-хостом. В качестве хоста выступает программно-управляемый USB-контроллер на стороне компьютера, который обеспечивает функциональность всего интерфейса.

На логическом уровне устройство USB поддерживает транзакции приёма и передачи данных. Каждый пакет каждой транзакции содержит в себе номер конечной точки

(*endpoint*) на устройстве. При подключении устройства драйверы в ядре операционной системы (ОС) читают с устройства список оконечных точек и создают управляющие структуры данных для общения с каждой оконечной точкой устройства.

Время шины делится на периоды, в начале периода контроллер передаёт всей шине пакет «начало периода». Далее в течение периода передаются пакеты прерываний, потом изохронные в требуемом количестве, в оставшееся время в периоде передаются управляющие пакеты и в последнюю очередь – поточные [20].

Размер пакета для оконечной точки – это константа, встроенная в таблицу оконечных точек устройства и изменению не подлежит. Он выбирается разработчиком устройства из числа тех, что поддерживаются стандартом *USB*.

Результаты (Results)

Управляющее устройство

Часть блока управления заменена на более производительное и современное устройство (рис. 6) с возможностью подключения к компьютеру, при том, что ее габариты значительно меньше, чем у печатной платы *Atmel STK500*. Теперь новая версия может быть расположена с оборотной стороны алюминиевого корпуса анализатора.

Новая плата управления представляет собой устройство на базе микроконтроллера *ATmega328*, интегрированного в отладочную плату *Arduino Nano* и имеет лучшие характеристики по большинству параметров в сравнении с предыдущим вариантом. К тому же микроконтроллер, использованный в предыдущей версии устройства управления, морально устарел и не подходит для новых промышленных экземпляров установки ввиду отсутствия стабильных поставок на рынке, что также обосновывает переход на новый популярный МК.

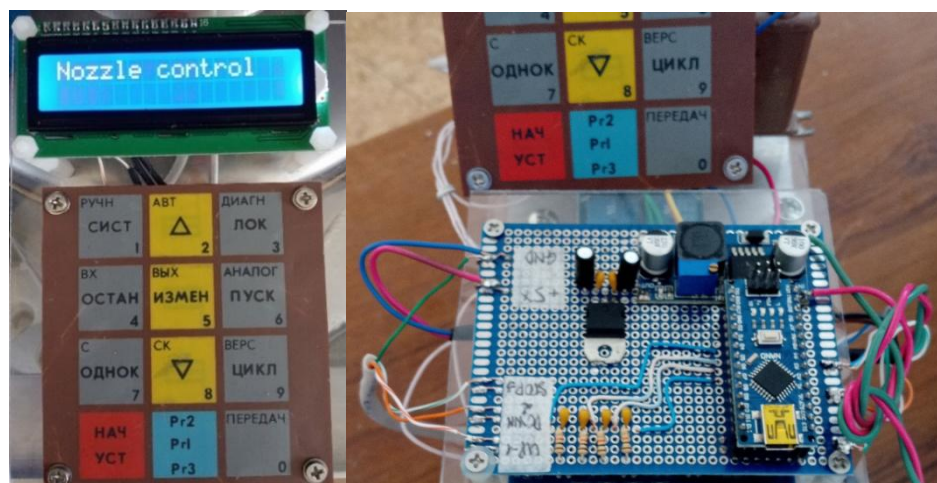


Рис. 6. Пульт контроля и управления на базе интегрированного микроконтроллера *ATmega328* на *Arduino Nano*

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

Пульт управления на базе нового микроконтроллера представляет собой клавиатуру формата 3x4 с 12-ю кнопками, подключенную к *Arduino Nano* для установки параметров и управления перемещением патрубка. На пульте устройства управления также расположен ЖК-дисплей для отображения состояния перемещения и расстояния, на которое переместился патрубок. Основным компонентом этой части является интегральная микросхема драйвера управления двигателем. МК работает от понижающего стабилизатора питания, поскольку все устройство питается от сети 220В.

Схемотехника системы пробоотбора

На рисунке 7 представлена схема управления электродвигателем. Сигналы управления на данной схеме передаются на двигатель СД-54 через драйверы, состоящие из 6 реле с 2 контактами. Реле изолированы от МК с помощью оптопар *PC817*. Таким образом создается защита от электромагнитных помех, возникающих при замыкании и размыкании контактов реле, что помогает МК работать стабильно. Двигатель СД-54 подключен к сети питания 220 В, 50 Гц, поэтому выбирается схема, где 2 конденсатора *C4* и *C6* (*C4* – МБЧГ-1-2А-250В-0,5±10% мкФ; *C6* – МБЧГ-1-2А-250В-2,0±10% мкФ) подключаются к 2 катушкам двигателя и приводу для управления направлением вращения двигателя.

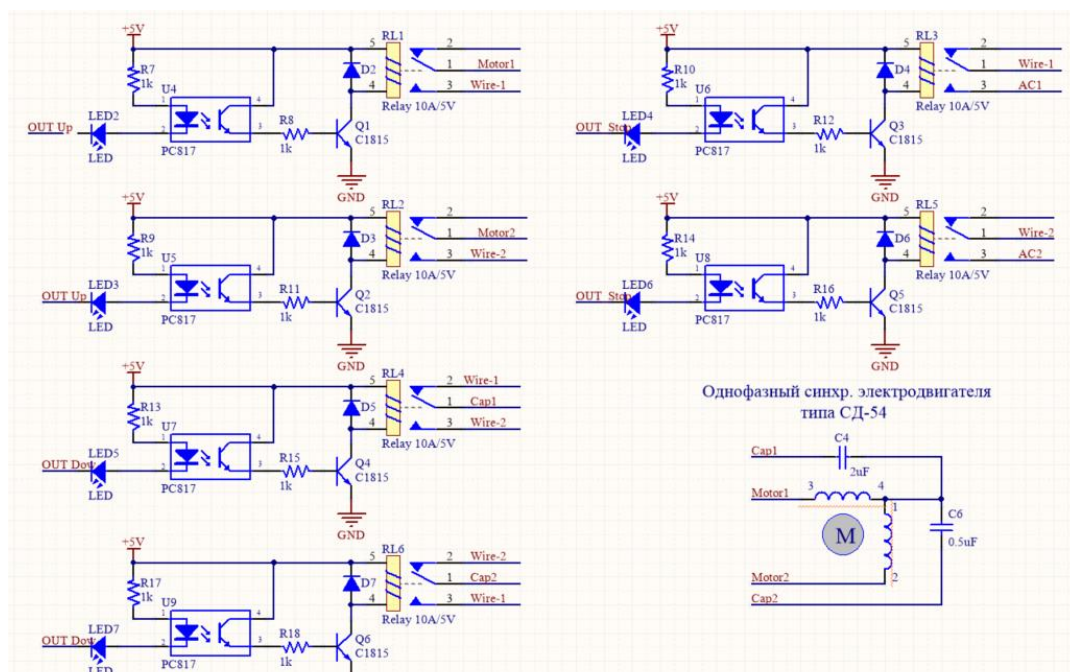


Рис. 7. Принципиальная электрическая схема однофазного синхронного электродвигателя и драйвера

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

Принципиальная схема преобразователя питания показана на рисунке 8. На рисунке 9 приводится его реальный вид.

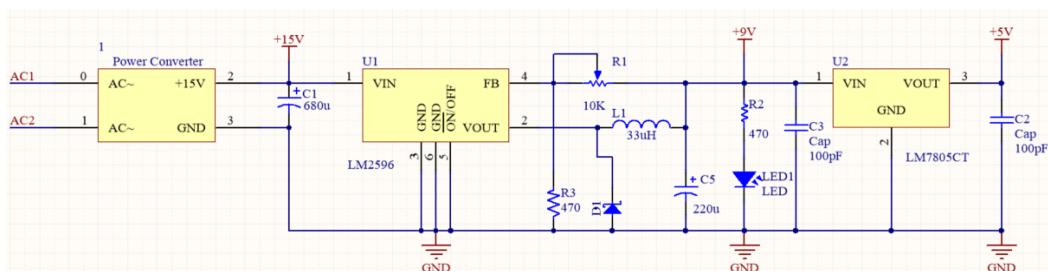


Рис. 8. Принципиальная схема преобразователя низкого напряжения от 15В до 9В и 5В

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



Рис. 9. Преобразователь переменного тока 220 В в постоянный ток 15В

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

Источник питания от преобразователя переменного тока 220В/50Гц в постоянный ток 15В/2,8А дополнительно понижен до 9В для *Arduino Nano* и 5В для драйверов, энкодера и пульта управления. Поскольку силовой преобразователь использует в качестве компонентов множество катушек индуктивности и импульсных трансформаторов, во время работы он

создает большое количество электромагнитных шумов, интенсивность которых может повлиять на работу МК. Чтобы устранить этот шум, преобразователь обернут тонкой алюминиевой фольгой, что позволяет использовать эффект клетки Фарадея для ограничения и устранения помех.

Перед работой устройства необходимо подключить преобразователь напряжения к электрической сети 220В. При подключении к сети на плате загорается светодиод сигнализируя от том, что устройство готово к работе. На пульте управления следует обратить внимание на 3 кнопки: 1 – вперед, 2 – назад и 3 – стоп (обозначения остальных кнопок соответствуют клавиатуре, предназначенной для управления всего анализатора ПМРА-IV). Управляющий сигнал и значение перемещения патрубка отображаются на ЖК-дисплее. Значение, отображаемое на ЖК-дисплее, изменяется от 0 до 13 и наоборот, что соответствует расстоянию, на которое можно переместить патрубок (0-13 см). Алгоритм управления патрубком пробоотборника следующий:

В исходном состоянии патрубок находится в нижнем положении в измеряемой жидкости, что соответствует расстоянию перемещения 0 см. В это время алгоритм на МК позволяет только поднимать патрубок. При нажатии на кнопку 1 (вперед) на пульте управления включается двигатель и через приводной механизм поднимается патрубок. В это время энкодер вращается вдоль оси ходового винта и преобразовывает скорость вращения энкодера в расстояние перемещения патрубка. Значение перемещения отображается на жидкокристаллическом дисплее вместе со статусом перемещения патрубка. Таким образом, патрубок постепенно поднимается до конца хода. В конце хода (13 см) двигатель прекращает работу по команде управления МК. В данном случае оператор может лишь нажать кнопку 2, чтобы повернуть вращение двигателя вспять и опустить патрубок. Чтобы остановить двигатель оператору необходимо нажать кнопку 3 – стоп. Точно так же плавно можно регулировать положение патрубка вдоль всей оси до тех пор, пока в ПМР-датчик не поступит необходимое количество пробы.

Программное обеспечение системы управления пробоотбором

Прибором изменения положения патрубка также можно управлять с ноутбука с помощью интерфейса управляющего программного обеспечения (рис. 10), через USB-соединение между ноутбуком и *Arduino Nano*. Управляющее ПО построено на платформе *LabVIEW*, языком программирования в виде блок-схем, который позволяет внедрять программы и управляющее программное обеспечение с высокой совместимостью с различными периферийными устройствами. Программное обеспечение состоит из 2 блоков: ПОДКЛЮЧЕНИЕ и УПРАВЛЕНИЕ. В блоке подключения по умолчанию установлена скорость передачи данных между ноутбуком и *Arduino Nano* с baudrate 115200. Окно «*VISA resource name*» используется для выбора COM-порта. Кнопка СТОП используется для остановки и выхода из программы управления. В блоке управления расположены кнопки "ВПЕРЕД", "НАЗАД", "СТОП" с подсветкой, отображающей состояние кнопки. Эти кнопки соответствуют кнопкам на пульте управления. Встроена горизонтальная градуированная шкала с соответствующим окном отображения значений, используемая для отображения относительного положения патрубка.

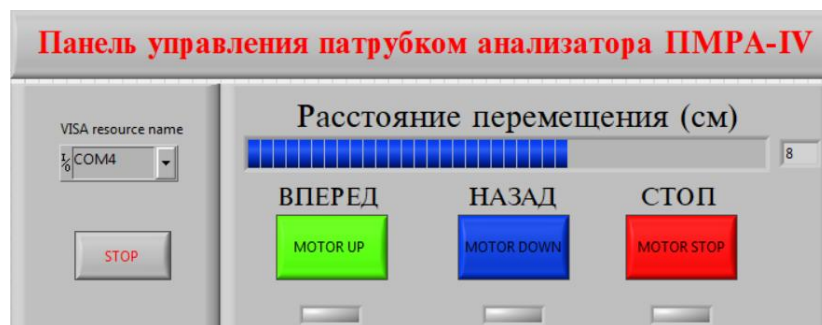


Рис. 10. Интерфейс управляющего программного обеспечения Fig. 10. Control software interface

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

Алгоритм управления патрубком пробоотборника в этом случае работает с помощью самостоятельно разработанного программного обеспечения (рис. 11), аналогичного управлению с пульта. Кроме того, управляющие команды можно устанавливать с клавиатуры ноутбука. Кнопки *U-Up*-ВПЕРЕД, *S-Stop*-СТОП, *D-Down*-НАЗАД соответствуют командам управления. Эти управляющие команды передаются с ноутбука на

Arduino Nano по последовательной связи USB в соответствии с принципом "Ведущий-ведомый".

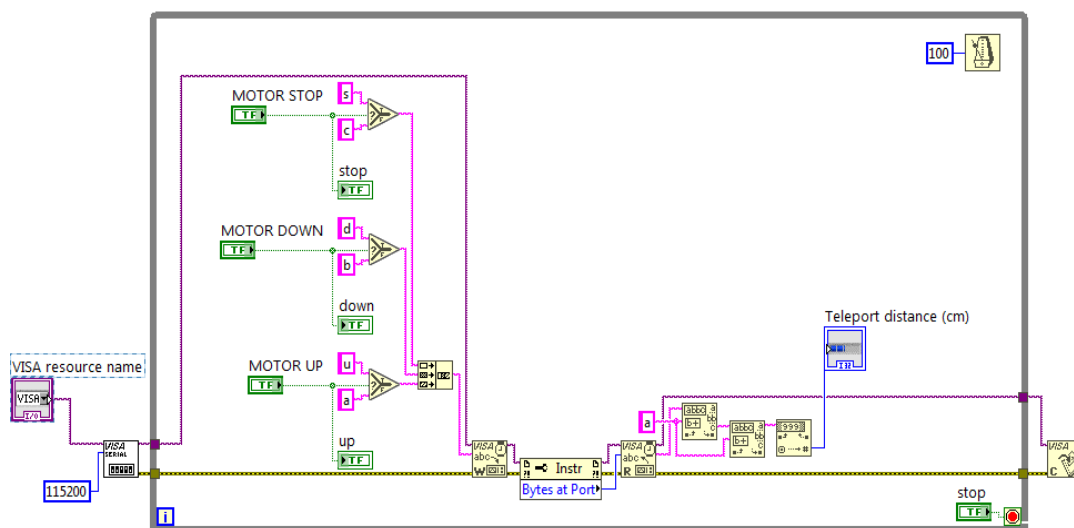


Рис. 11. Программа управления патрубком в среде LabView Fig. 11. Nozzle control program in LabView environment

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

Заключение (Conclusions)

Эффективность добычи и обработки нефти в нефтяной промышленности напрямую зависит от качества диагностики скважинной жидкости. Неразрушающий контроль позволяет получать оперативную информацию, необходимую для оптимизации технологических процессов на данных предприятиях, что в свою очередь позитивно влияет на экономический фактор соответствующих производств. Поэтому разработка измерительного оборудования и приборов для контроля проб в процессах добычи нефти имеет важное научное и практическое значение для удовлетворения потребностей развития в отечественном нефтепромысле.

В связи с необходимостью обеспечения эффективного контроля нефти, учеными из Казанского Государственного Энергетического Университета была проведена разработка проточного анализатора нефти ПМРА-IV. Испытания показали, что система пробоотбора, используемая для подачи образцов на датчик ранее, была неэффективной. В рамках работы, описанной в данной статье, было проведено исследование для усовершенствования этой установки.

К основным результатам исследовательской работы относятся следующие пункты:

1. Усовершенствовано оборудование пробоотбора для ПМРА-IV, которое обеспечивает точный плавный забор нефти из любой трубы при любом расходе и позволяет регулировать объем проб;
2. Усовершенствован механизм управления электроприводом двигателя, который способен стабильно работать в условиях электромагнитных помех, создаваемых двигателем и преобразователем питания;
3. Создан алгоритм для плавного изменения положения патрубка в системе пробоотбора ПМРА-IV;
4. Разработан компактный программно-аппаратный комплекс для управления патрубком на основе МК ATmega и ПО LabVIEW с возможностью контроля пультом управления или ПО на компьютере.

Литература

1. Кашаев, Р. С. Аппаратура и методики ЯМР-анализа нефтяных дисперсных систем. Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, Germany: Ядерная физика, 2012. С.100-112.
2. Воробьев А.Е., Тчаро Х., Воробьев К.А. Цифровизация нефтяной промышленности: «интеллектуальный» нефтепромысел // Вестник Евразийской науки. 2018. №3. Том 10. С.71-86.
3. Нюхлов А.С., Татаринцева Ю.В., Харитонов К.А., и др. Преимущества использования технологии smart-field для повышения эффективности регионального управления предприятий нефтегазовой отрасли Красноярского края // Современные тенденции развития науки и производства:

сборник материалов VI Международной научно-практической конференции (5 июля 2017 года), Том II – Кемерово: ЗапСибНЦ, 2017. С. 77-79.

4. Сафиуллин Б.Р., Козелкова В.О., Кашаев Р.С., и др. Очистка нефти от асфальтено-смола и парафинов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 5. С. 166-178.

5. Н. Т. Киен, Ч. В. Тунг, Р. С. Кашаев. Определение параметров скважинной жидкости проточным ПМР-анализатором // IV Национальной н/пр. конф. ПАЭТЭКЖКХ. (Казань 6-7 декабря 2018 г.). - Казань, 2018. - Т.1. - С. 147-150.

6. A. Karseev, V. Vologdin, V. Davydov, Features of nuclear magnetic resonance signals registration in weak magnetic fields for express – control of biological solutions and liquid medium by nuclear magnetic spectroscopy method, Journal of Physics: Conference Series. Volume 643-2015.

7. Ч. В. Тунг Последовательность Карра-Парселла для измерений времен спин-спиновой релаксации T2 // V Национальная конференция «Приборостроение и автоматизированный электропривод». (Казань 12-13 декабря 2019 г.). -Казань, 2019. - Т.1. - С. 147-150.

8. 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.

9. O.V. Kozelkov, A.G. Michailov, V.O. Kozelkova, et al., “Technologies of express-control apparatus-programmable complex on the base of PMR”, Russ. Chemical Technology, V.23, №3, 2022, pp.131-137.

10. N.G. Min, M. Ku, J. Yang, et al., “Microfluidic production of uniform microcarriers through phase separation in emulsion droplets”, Chemistry of Materials 2016 28 (5), pp. 1430-1438.

11. Киен Н.Т., Тунг Ч.В., Кашаев Р.С. Определение параметров скважинной жидкости проточным ПМР-Анализатором // Материалы докладов 4 Поволжская научно-практическая конференция. Приборостроение и автоматизированный электропривод и топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве, Казань, ФГБОУ ВО КГЭУ, 6-7 декабря 2018 г. С 147–150.

12. Кашаев Р.С., Тунг Ч.В., Киен Н.Т., и др.. Проточный анализатор нефти на базе протонного магнитного резонансного релаксометра // Сборник научных трудов по материалам I Межд. н/пр. конференции, 30 июня 2018 года, г. Смоленск. С.89-90.

13. Kashaev, R.; Anh, N.D.; Kozelkova, V.; et al. Online Multiphase Flow Measurement of Crude Oil Properties Using Nuclear (Proton) Magnetic Resonance Automated Measurement Complex for Energy Safety at Smart Oil Deposits. Energies 2023, 16(3), 1080.

14. Корнеев С.А., Корнеев В.С., Пеньков И.А., Трибельский М.И. Методика и результаты статических испытаний резинокордного патрубков для соединения трубопроводов // ОНВ. 2014. №2 С.139-145.

15. Kashaev R.S. Apparature and NMR-method of oil disperse systems analysis. Lambert Academic publishing (LAP). GmbH&Co.KG, Saarbrücken, Germany, 2012. pp.92.

16. G.A. Ovseenko, O.V. Kozelkov, R.S. Kashaev, et al. “Apparatus for on-line structure-dynamical analysis of oils by nuclear magnetic resonance relaxometry method”. Internat. Conf. «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration». Beijing, PRC, Abstracts. Sept.15, 2021, pp. 190-194.

17. Kashaev R.S., Nguyen D.A., Kozelkov O.V. Apparatus-program complex for on-line express-control of crude oils properties by proton magnetic resonance method. Practice Oriented Science: UAE - RUSSIA - INDIA. Proceedings of the International University Scientific Forum. UAE, 2023. pp. 213-220.

18. Гинзбург М. Я. Возможности увеличения эффективности добычи нефти установками электроприводных насосов за счет оптимизации кодификации оборудования в Общероссийских классификаторах основных фондов // Территория Нефтегаз. 2018. №7–8. С.64-75.

19. Kurilin A., USB is easy. Switching from RS-232 to USB // Components and Technologies. 2005. N49.Pt.1. pp. 114–117.

20. Башлыков Александр Особенности реализации протокола usb в микроконтроллерах LPC214x производства Philips // Компоненты и Технологии. 2005. №51. С.106 – 108.

Авторы публикации

Нгуен Дык Ань – аспирант кафедры «Приборостроение и мехатроника», Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия. ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-8870-3855>. Email: navypro1991@gmail.com

Кашаев Рустем Султанхамитович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Приборостроение и мехатроника», Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8582-1577>. Email: kashaev2007@yandex.ru

Козелков Олег Владимирович – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Приборостроение и мехатроника», Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6067-8719>. Email: ok.1972@list.ru

Арсланов Амир Динарович – аспирант кафедры «Приборостроение и мехатроника», Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2128-6258>. Email: arslanovad97@gmail.com

Чан Ван Тунг – канд. техн. наук, преподаватель, Ханойский промышленный университет, г. Ханой, Вьетнам. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6057-2367>. Email: tungtv@hau.edu.vn

References

1. Kashaev, R. S. Apparatura i metodiki YaMR-analiza neftyanykh dispersnykh sistem. Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, Germany: Yadernaya fizika, 2012. S.100-112. (In Russ).
2. Vorob'ev A.E., Tcharo Kh., Vorob'ev K.A. Tsifrovizatsiya neftyanoi promyshlennosti: «intelektual'nyi» neftepromysel // Vestnik Evraziiskoi nauki. 2018. №3. Vol 10. S.71-86 (In Russ).
3. Nyukhlov A.S., Tatarintseva Yu.V., Kharitonov K.A., et al. Preimushchestva ispol'zovaniya tekhnologii smart-field dlya povysheniya effektivnosti regional'nogo upravleniya predpriyatii neftegazovoi otrasli Krasnoyarskogo kraia // Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i proizvodstva: sbornik materialov VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (5 iyulya 2017 goda), Tom II – Kemerovo: ZapSibNTs, 2017. S. 77-79. (In Russ).
4. Safiullin B.R., Kozelkova V.O., Kashaev R.S., et al. Ochistka nefti ot asfal'teno-smol i parafinov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI. 2022. T.24. № 5. S. 166-178. (In Russ).
5. N. T. Kien, Ch. V. Tung, R. S. Kashaev. Opredelenie parametrov svazhinnoi zhidkosti protochnym PMR-analizatorom // IV Natsional'noi n/pr. konf. PAETEKZhKKh. (Kazan' 6-7 dekabrya 2018 g.). - Kazan', 2018. - T.1. - S. 147-150. (In Russ).
6. A. Karseev, V. Vologdin, V. Davydov, Features of nuclear magnetic resonance signals registration in weak magnetic fields for express – control of biological solutions and liquid medium by nuclear magnetic spectroscopy method, Journal of Physics: Conference Series, Volume 643-2015. doi: 10.1088/1742-6596/643/1/012108
7. Ch. V. Tung Posledovatel'nost' Karra-Parsella dlya izmerenii vremen spin-spinovoi relaksatsii T2 // V Natsional'naya konferentsiya «Priborostroenie i avtomatizirovannyi elektroprivod». (Kazan' 12-13 dekabrya 2019 g.). -Kazan', 2019. - T.1. - S. 147-150. (In Russ).
8. Chan Van Tung, Kashaev R.S. Radiochastotnyi generator i programma impul'snykh posledovatel'nostei relaksometra PMR // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI. 2020. T. 22, № 3. S. 90-96. (In Russ).
9. O.V. Kozelkov, A.G. Michailov, V.O. Kozelkova, et al., “Technologies of express-control apparatus-programmable complex on the base of PMR”, Russ. Chemical Technology, V.23, №3, 2022, pp.131-137.
10. N.G. Min, M. Ku, J. Yang, et al., “Microfluidic production of uniform microcarriers through phase separation in emulsion droplets”, Chemistry of Materials 2016 28 (5), pp. 1430-1438. DOI: 10.1021/acs.chemmater.5b04798
11. Kien N.T., Tung Ch.V., Kashaev R.S. Opredelenie parametrov skvazhinnoi zhidkosti protochnym PMR-Analizatorom // Materialy dokladov 4 Povolzhskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Priborostroenie i avtomatizirovannyi elektroprivod i toplivo-energeticheskoy komplekse i zhilishchno-kommunal'nom khozyaistve, Kazan', FGBOU VO KGEU, 6-7 dekabrya 2018 g. S 147– 150. (In Russ).
12. Kashaev R.S., Tung Ch.V., Kien N.T., et al. Protochnyi analizator nefti na baze protonnogo magnitnogo rezonansnogo relaksometra // Sbornik nauchnykh trudov po materialam 1 Mezhd. n/pr. konferentsii, 30 iyunya 2018 goda, g. Smolensk. S.89-90. (In Russ).
13. Kashaev, R.; Anh, N.D.; Kozelkova, V.; et al. Online Multiphase Flow Measurement of Crude Oil Properties Using Nuclear (Proton) Magnetic Resonance Automated Measurement Complex for Energy Safety at Smart Oil Deposits. Energies 2023, 16, 1080; <https://doi.org/10.3390/en16031080>
14. Корнеев С.А, Корнеев В.С., Пеньков И.А., Трибельский М.И. Procedure and Results of Static Tests of Rubber-Cord Pipe Connection for Pipeline Connection.OHB. 2014. №2:139-145. (in Russ).
15. Kashaev R.S. Apparatura and NMR-method of oil disperse systems analysis. Lambert Academic publishing (LAP). GmbH&Co.KG, Saarbrücken, Germany, 2012. pp.92.
16. G.A.Ovseenko, O.V.Kozelkov, R.S.Kashaev, et al.; “Apparatus for on-line structure-dynamical analysis of oils by nuclear magnetic resonance relaxometry method”. Internat. Conf. «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration». Beijing, PRC, Abstracts. Sept.15, 2021, pp. 190-194.
17. Kashaev R.S., Nguyen D.A., Kozelkov O.V. Apparatus-program complex for on-line express-

control of crude oils properties by proton magnetic resonance method. Practice Oriented Science: UAE - RUSSIA - INDIA. Proceedings of the International University Scientific Forum. UAE, 2023. pp. 213-220.

18. Ginzburg M. Y. Possibilities of Increasing the Efficiency of Oil Production by Electric Drive Pumps Units by Optimizing the Codification of Equipment in the All-Russian Classifiers of Fixed Assets. Territory Neftegaz. 2018; 7–8: 64–75. (In Russ).

19. Kurilin A., USB is easy. Switching from RS-232 to USB // Components and Technologies. 2005. N49. Pt.1. pp. 114–117.

20. Башлыков А. Features of the USB protocol implementation in LPC214x microcontrollers manufactured by Philips. Components & Technologies. 2005; 51: 106–108. (In Russ).

Authors of the publication

Nguyen Duc Anh – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-8870-3855>. Email: navypro1991@gmail.com

Rustem S. Kashaev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8582-1577>. Email: kashaev2007@yandex.ru

Oleg V. Kozelkov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6067-8719>. Email: ok.1972@list.ru

Amir D. Arslanov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2128-6258>. Email: arslanovad97@gmail.com

Tran Van Tung – Hanoi University of Industry, Hanoi, Vietnam. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6057-2367>. Email: tungtv@hau.edu.vn

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

Получено 04.05.2024 г.

Отредактировано 28.10.2024 г.

Принято 01.11.2024 г.



ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Растворова И.И., Смирнов В.А.

Санкт-Петербургский Горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия
Vovsm1999@gmail.com

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Применение электронных измерительных устройств в процессе бурения скважин в особенно сложных и уникальных условиях Антарктиды. В условиях экстремально низких температур, которые характерны для этого региона, поставлена задача обеспечить надежную работу электроники, что является критически важным для успешного выполнения буровых операций и получения точных данных. Особое внимание уделено анализу различных методов защиты электронных устройств от отрицательных температур. Исследуются многочисленные подходы к термоизоляции, а также используются инновационные материалы, которые способны минимизировать влияние холодного воздуха на чувствительные компоненты электроники. **ЦЕЛЬ.** Целью работы является исследование актуальных электронных измерительных систем, используемых при бурении скважин в условиях Антарктиды, а также проведение эксперимента над серийными датчиками температуры с использованием охлаждающей камеры. **МЕТОДЫ.** В рамках работы проведены тщательные эксперименты с температурными датчиками различных типов и форматов. Тестирование осуществлялось в специальных охлаждающих камерах, что позволило моделировать реальные условия, с которыми сталкиваются устройства в Антарктиде. Кроме того, в исследовании рассматривается влияние расположения датчиков относительно микрочипов, что также может существенно влиять на их показатели точности и надежности. Важной частью работы стал эксперимент с электроникой, покрытой водонепроницаемым полимерным покрытием. Это покрытие не только защищает устройства от влаги, но и дополнительно изолирует их от холода, что в условиях Антарктики имеет первостепенное значение. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Полученные результаты позволяют сделать выводы о наиболее эффективных способах защиты электронных измерительных устройств для бурения в непростых климатических условиях, а также открывают новые горизонты для дальнейших исследований в данной области.

Ключевые слова: бурение; микроэлектроник; температурный датчик; низкие температуры; Антарктида.

Для цитирования: Растворова И.И., Смирнов В.А. Исследование работы измерительной микроэлектроники в низкотемпературных климатических условиях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 1. С. 16-26. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-16-26.

STUDY OF THE PERFORMANCE OF MEASUREMENT MICROELECTRONICS IN LOW-TEMPERATURE CLIMATIC CONDITIONS

Rastvorova I.I., Smirnov V.A.

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia
Vovsm1999@gmail.com

Abstract: **ACTUALLY.** The work addresses the topic of using electronic measuring devices in the drilling process of wells under particularly challenging and unique conditions in Antarctica. In the context of extremely low temperatures, characteristic of this region, the task is to ensure the reliable operation of electronics, which is critically important for the successful execution of drilling operations and obtaining accurate data. Special attention is given to analyzing various methods for protecting electronic devices from negative temperatures. Numerous approaches to

thermal insulation are explored, and innovative materials are utilized to minimize the impact of cold air on sensitive electronic components. **OBJECT.** The aim of the work is to investigate current electronic measurement systems used in drilling wells under Antarctic conditions, as well as to conduct experiments on series temperature sensors using a cooling chamber. **METHODS.** The study includes thorough experiments with temperature sensors of various types and formats. Testing was conducted in specialized cooling chambers, allowing for the modeling of real conditions faced by devices in Antarctica. Furthermore, the study examines the impact of the sensor placement relative to the microchips, which can significantly affect their accuracy and reliability. An important part of the work was an experiment with electronics covered by a waterproof polymer coating. This coating not only protects the devices from moisture but also provides additional insulation against cold, which is of paramount importance in Antarctic conditions. **RESULTS.** Thus, the results obtained allow conclusions to be drawn about the most effective ways to protect electronic measuring devices for drilling in challenging climatic conditions, as well as opening new horizons for further research in this area.

Keywords: drilling; microelectronics; temperature sensor; low temperatures; Antarctica.

For citation: Rastvorova I.I., Smirnov V.A. Study of the performance of measurement microelectronics in low-temperature climatic conditions. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (1): 16-26. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-16-26.

Введение (Introduction)

Изучение подледниковых озер Антарктиды, а также самого ледяного покрова материка уже долгое время интересует мировое научное сообщество из разных сфер, поскольку они имеют уникальную, неискаженную воздействием человека информацию о Земле. Для детального исследования ледяного покрова необходимо производить отбор керн на различных глубинах. Также немалый интерес представляют подледниковые озера, расположенные на больших глубинах. Бурение осложняется следующими факторами:

- Сложная логистика. Транспортировка металлоемких конструкций и большого количества топлива очень ресурсозатратна, а в некоторых случаях – невозможна.
- Сложные климатические условия (давление, температура).
- Уникальная природная зона. Загрязнение или нарушение экологии может привести к необратимым последствиям.

На сегодняшний день электромеханическая буровая установка, используемая Российской экспедицией в Антарктиде, не обладает достаточным количеством электронных измерительных средств, что приводит к снижению эффективности и скорости бурения. В условиях Антарктики эффективное бурение непосредственно зависит от точности измерений, что в свою очередь определяется качеством электронных систем, участвующих в процессе. Наличие современных измерительных приборов позволяет не только оперативно получать данные о состоянии окружающей среды и самих буровых установок, но и минимизировать возможные ошибки, связанные с изменением климатических условий. Использование современной микроэлектроники осложняется в первую очередь уникальными климатическими условиями [1, 2], в частности низкой температурой и атмосферным давлением. Эти факторы могут влиять на функционирование и точность измерительных систем, а также приводить к увеличению вероятности поломок оборудования в условиях резких температурных перепадов. Иностранные буровые установки имеют гораздо более современное электронное сопровождение, но которое также имеет ряд недостатков [3]. Так из результатов исследований на станции Восток удалось выявить слабые места в измерительной технике и установить возможности в доработке измерительного оборудования [4, 5]. Целью работы является исследование актуальных электронных измерительных систем, используемых при бурении скважин в условиях Антарктиды, а также проведение эксперимента над серийными датчиками температуры с использованием охлаждающей камеры. Для достижения цели необходимо проанализировать современные технологии в этой области, определить их недостатки и оптимизировать процесс, что позволит повысить эффективность буровых работ и обеспечить более качественные и надежные результаты измерений процесса бурения.

Попадание внутрь электронного прибора даже небольшого количества влаги может быть разрушительно. Существует стандарт степени защиты электронных приборов ГОСТ 14254-2015. На производствах или месторождениях, где электроника расположена в

непосредственной близости с водной средой, используются приборы, изготовленные по стандарту IP68 и IP69 (с пометкой о максимальном давлении жидкости). Для выполнения требований этих стандартов наиболее распространенный метод – использование водонепроницаемых корпусов, но он имеет ряд недостатков [6].

Полимерные защитные покрытия в отличие от корпусной герметизации наиболее экономичным и менее трудоемким методом.

Уникальным и наиболее эффективным методом надежной защиты электронных устройств различного назначения от внешних факторов является нанесение поли-параксилиленовых из газовой фазы в вакууме. Покрытия, получаемые вакуумным осаждением, имеют существенное отличие по структуре и свойствам от покрытий, формируемых из жидких сред, и реализуют свои защитные свойства при значительно меньших толщинах. Процесс получения ППКП осуществляется на специальных вакуумных установках.

Буровые работы в Антарктиде осложнены низкими температурами на поверхности и в ледниках, отсутствием дорог и инфраструктуры, штормовыми ветрами, снегопадами и другими погодными явлениями. Традиционные роторные буровые установки для бурения керна в ледниках должны иметь большой вес и мощность, что затрудняет их адаптацию для исследования ледников. Для бурения глубоких скважин в Антарктиде были разработаны специальные электромеханические буры на тросовой подвеске. Основной особенностью электромеханической технологии бурения льда является способ опускания и подъема бура в скважину. Вместо труб, которые используются в обычных роторных буровых установках для подачи энергии для разрушения горных пород на забое скважины и извлечения используется забойная установка, бронированный трос и лебедка.

Такая конструкция не только снижает массу и энергопотребление бурового оборудования, но и сокращает время проходки в скважину и из скважины, упрощает очистку скважины от шлама. Технологии по очистке скважины от шлама также модифицируются.

Первая электромеханическая установка была разработана в США в 1940 году. Немного позже в 1956 в СССР была разработана собственная буровая установка для бурения в условиях Антарктиды.

В настоящее время все буровые установки, используемые в Антарктиде, имеют тепловые, герметичные камеры для размещения в них электроники, производящей мониторинг параметров процесса бурения [7].

Антарктической подледниковой буровой установке, разработанной в Центре полярных исследований Университета Цзилинь, Китай (рис. 1). В этом случае применяется уникальное технологическое решение и конструкция измерительного устройства, расположенного в тепловой камере. Помимо поддержания климата вокруг электронного устройства, тепловая камера является еще и защитой от ударов, высокого уровня вибраций, попадания крупных и мелких частиц керна, а также от влаги. Такое решение хорошо показало себя на практике [8]. Благодаря автоматически поддерживаемому климату в камере есть возможность расположить недорогую электронику, неприспособленную к сложным температурным условиям. Помимо применения электроники в процессе глубокого бурения, также большое значение ее использование имеет в геофизических исследованиях. Каротаж скважин в ледниках представляет собой важный источник информации о физической обстановке в скважине и решает две основные задачи: контролировать техническое состояние скважины и изучать структуру льда [9, 10].

Российская экспедиция использует буровую установку марки КЭМС-132 (рис. 2). Данная буровая установка показала себя как одно из лучших решений для бурения в условиях Антарктиды. С ее помощью была пробурена самая глубокая скважина в этом регионе [11].

В настоящее время специально для ледниковых исследований разработаны кусочные скважинные регистраторы на основе использования 3D-акселерометров и 3D-магнитометров. Эти регистраторы использовались для получения кинематических измерений текучего льда на леднике Джарвис, Аляска [10, 12] и для определения профиля деформации ледника, который определяется по измерениям наклона скважины на леднике Store, Гренландия [13]. Новый скважинный регистратор, предназначенный для сверхнизких температур и сверхвысоких давлений, разработанный в Центре полярных исследований Цзилиньского университета в Китае, позволяет одновременно измерять несколько параметров скважины: температуру, давление, угол наклона скважины, азимут скважины, ориентированный по стволу диаметр и поперечное сечение, разрез [14, 15].

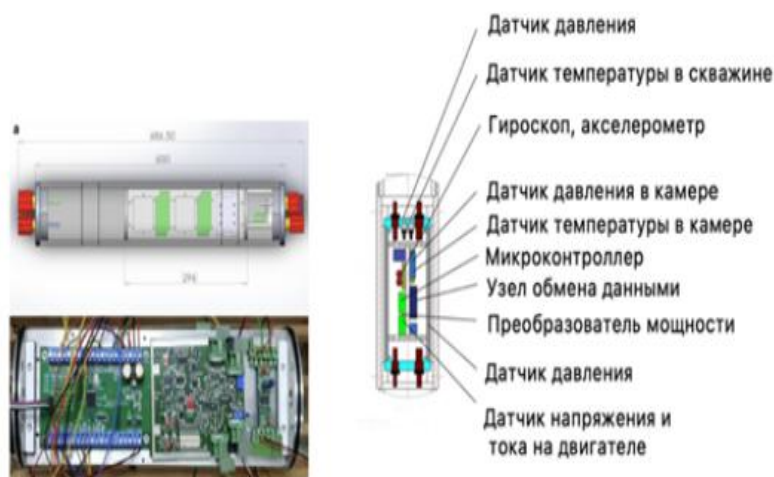


Рис. 1. Внешний вид и расположение элементов в тепловой камере

Fig. 1. Appearance and arrangement of elements in the thermal chamber

*Источник: [8] Source:[8].

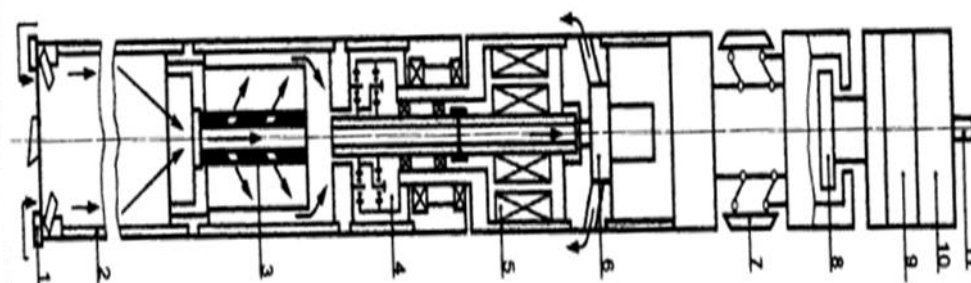


Рис. 2. Электромеханический бур КЭМС-132:

Fig. 2. Electromechanical drill KEMS-132:

1 – буровая головка, 2 – колонковый бур, 3 – камера с фильтром для шлама, 4 – редуктор, 5 – приводной электродвигатель, 6 – насос, 7 – противомomentная система, 8 – ударный блок, 9 – электрокамера, 10 – скоба подвеса троса, 11 – трос

1 – drilling head, 2 – column drill, 3 – chamber with a mud filter, 4 – gearbox, 5 – drive electric motor, 6 – pump, 7 – counter-torque system, 8 – impact block, 9 – electric chamber, 10 – cable suspension bracket, 11 – cable

*Источник: [11] Source:[11].

Основной проблемой использования электроники в условиях Антарктиды является ее ненадежная защита от воздействия низкотемпературной среды, влажности и вибраций. Как было отмечено выше, все электронные компоненты буровой установки располагают в тепловые герметичные камеры, которые обладают следующими проблемами:

1. Высокое энергопотребление, расходуемое на обогрев камеры.
2. Высокий риск повреждения герметичности камеры.

В условиях Антарктиды, где существуют большие проблемы с логистикой, и как следствие ограниченного количества топлива, необходимо избегать лишнего потребления электроэнергии. А поскольку буровые установки в сезон бурения работают круглосуточно, то потребление энергии на обогрев электроники нельзя недооценивать.

При повреждении камеры происходит нарушение теплоизоляционного слоя, что приводит к большим потерям энергии. Расчет этих потерь дает понимание о невозможности функционирования оборудования в штатном режиме, что приводит к снижению времени и качества работы [16, 17]. Также появляется риск попадания влаги внутрь корпуса с электроникой, что приведет к выводу ее из строя, что в некоторых случаях может быть недопустимо.

Для решения проблемы надежности одним из способов является использование сразу несколько дублирующих друг друга камер с датчиками, как представлено на рисунке 3.

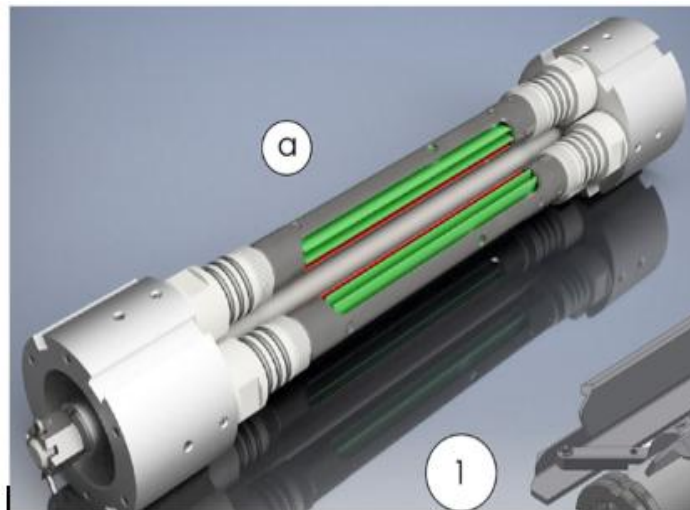


Рис. 3. Тепловая герметичная камера с четырьмя блоками измерительных устройств

Fig. 3. Thermal hermetic chamber with four measuring device units

*Источник: [18] Source:[18].

Решение использовать несколько аналогичных устройств повышает надежность в ущерб стоимости и потребления энергии.

Еще одним способом повышения надежности является использование датчика разгерметизации методом обнаружения утечек, основанном на контроле влажности. В электронной камере давления установлен датчик влажности на основе емкостного датчика. Если камера давления протекает, протечка воды на чувствительной к влаге емкости вызывает изменение емкости, и обнаруживается заметное увеличение влажности. Утечка воды может быть обнаружена по значительному изменению влажности в камере. Китайские исследователи проверили данный метод на практике с непроводящей чистой водой. Экспериментальные результаты показывали, что этот метод реализуем [7].

Большинство производимой промышленной микроэлектроники с микросхемами менее 1 мкм имеют рабочий температурный диапазон от -40 до +70 градусов. Это связано с использованием полупроводниковых технологий в их основе. В бытовых условиях, условиях промышленного производства температура окружающей среды, как правило, не превышает устанавливаемого производителями микросхем диапазона, но нередко появляется необходимость в различных электронных устройствах и в более сложных температурных условиях. При высоких температурах электроника деградирует, а при температурах превышающих температуру плавления материалов интегральной схемы или микросхем устройство полностью или частично перестанет выполнять свои функции. Также есть большая вероятность короткого замыкания вследствие повреждения контактных площадок, что может привести к возгоранию. В настоящий момент наиболее распространенным способом защиты электроники от воздействия температур является использование материалов с фазовым переходом, в частности парафин. Такие покрытия позволяют защитить не только микроэлектронику, но и аккумуляторы. Литий-ионные (Li-ion) батареи были и являются источником питания для электронных устройств благодаря их высокой плотности энергии и мощности. Тем не менее, чувствительный к температуре литий-ионный аккумулятор требует строгих температурных условий от 20 до 55 °C для работы с высокой производительностью и высокой безопасностью. При высоких температурах выше 55 °C аккумуляторы подвержены потере емкости или даже тепловому разгону, что может привести к пожарам и взрывам. В то же время низкие температуры снижают проводимость электролита и скорость диффузии ионов лития батареи, что приводит к падению напряжения, необратимой потере емкости или даже внутреннему короткому замыканию [17, 19].

Для питания электроники с можно использовать суперконденсаторы, которые менее подвержены воздействию температур. Современные конденсаторы могут обладать даже большими емкостями, нежели традиционные литий-ионные и питать электронику с напряжением в тысячи вольт. Таким образом, можно избежать огромных затрат энергии, уходящих на обогрев изолированной камеры.

Материалы и методы (Materials and methods)

В качестве объектов исследования было взято следующее электронное оборудование в количестве четырех экземпляров:

1. Микроконтроллер PIC16F18855

2. Цепь для измерения температуры основанная на полупроводниковых диодах

Микроконтроллеры PIC16F18855 оснащены аналоговыми, независимыми от ядра периферийными устройствами и периферийными устройствами связи в сочетании с технологией экстремально низкого энергопотребления (XLP) для широкого спектра приложений общего назначения и с низким энергопотреблением. Платы поддерживают множество функций, включая светодиоды, датчики температуры, переключатели, динамики, интерфейсы RS-232. Данные микроконтроллеры получили широкое распространение в системах умного дома благодаря своей универсальности и производительности.

Полупроводниковые датчики температуры используются для широкого диапазона задач как промышленных условиях, так и бытовых. Физический принцип функционирования полупроводникового термометра заключается в том, что падение напряжения на прямосмещенном p-n переходе зависит от температуры. Эта зависимость имеет характеристики, близкие к линейным, что дает возможность разрабатывать датчики, которые не нуждаются в усложненных схемах для корректировки показаний [19].

Эксперимент проводился в холодильной камере с пределом отрицательной температуры в -60 градусов и был разделен на два этапа с отличными друг от друга начальными условия эксплуатации микроконтроллера. Это позволяет создать необходимые условия для изучения работы выбранных объектов в экстремально низкотемпературной среде. Заведомо известно, что в условиях низких температур могут возникать различные физические явления, которые могут повлиять на функционирование электронных элементов, такие как изменение электрических характеристик и увеличенный риск появления конденсата. На первом этапе микроконтроллер был исследован в условиях, приближенных к стандартным, чтобы получить базовые характеристики его работы, и затем подвержен воздействию температурного диапазона в -60 градусов. Это был основной этап, на котором мы планировали оценить, как низкие температуры влияют на работу электроники, а также на точность показаний термометра. На этом этапе важно отметить, что при понижении температуры электроника может демонстрировать различные эффекты, такие как задержка в обработке данных, нестабильность напряжения и температурные колебания, что может привести к ошибкам в измерениях. Основные параметры, которые измерялись в этот период, включали в себя стабильность работы процессора при заданной температуре и стабильность работы датчиков температуры. Этот этап был необходим для создания контрольной базы, с которой можно было бы сравнивать результаты, полученные в условиях низких температур.

Второй этап включал в себя проверку работоспособности оборудования, которое было предварительно охлаждено в холодильной камере до необходимой для измерений температуры, и сравнения результатов с полученными в первом этапе данными.

Важным аспектом, который также учитывался в ходе эксперимента, было влияние конденсата, который мог образовываться на поверхности оборудования из-за разницы температур между внутренней средой холодильной камеры и внешней атмосферой. Образование конденсата представляет собой значительную угрозу для работы микроэлектронных компонентов, так как может привести к коротким замыканиям и повреждению схем. Чтобы минимизировать риск, один из микроконтроллеров был покрыт влагозащитным пленочным покрытием. Это покрытие обеспечивает защиту от влаги, создавая барьер, который препятствует попаданию воды на чувствительные элементы устройства.

Для анализа степени воздействия этого физического явления на эксперимент один из контроллеров был покрыт влагозащитным пленочным покрытием. Использовались полимерные материалы, которые обеспечивают не только защиту от влаги, но и сохраняют свои изоляционные свойства при низких температурах. Этот эксперимент был направлен на то, чтобы продемонстрировать, как применение влагоустойчивых технологий может улучшить долговечность и надежность работы электронных компонентов в экстренных условиях.

Результаты (Results)

Производитель выбранной электроники указывает предел низкой температуры до -40 градусов по Цельсию. Температура в антарктических условиях может достигать порядка -60 градусов. В первом эксперименте мы производили запуск электронных устройств в помещении при комнатной температуре, затем помещали их в охлажденную до -60 градусов камеру и постепенно ее нагревали. Несмотря на температуру в камере ниже, чем заявлена производителем, устройства отработали в штатном режиме (рис. 4).

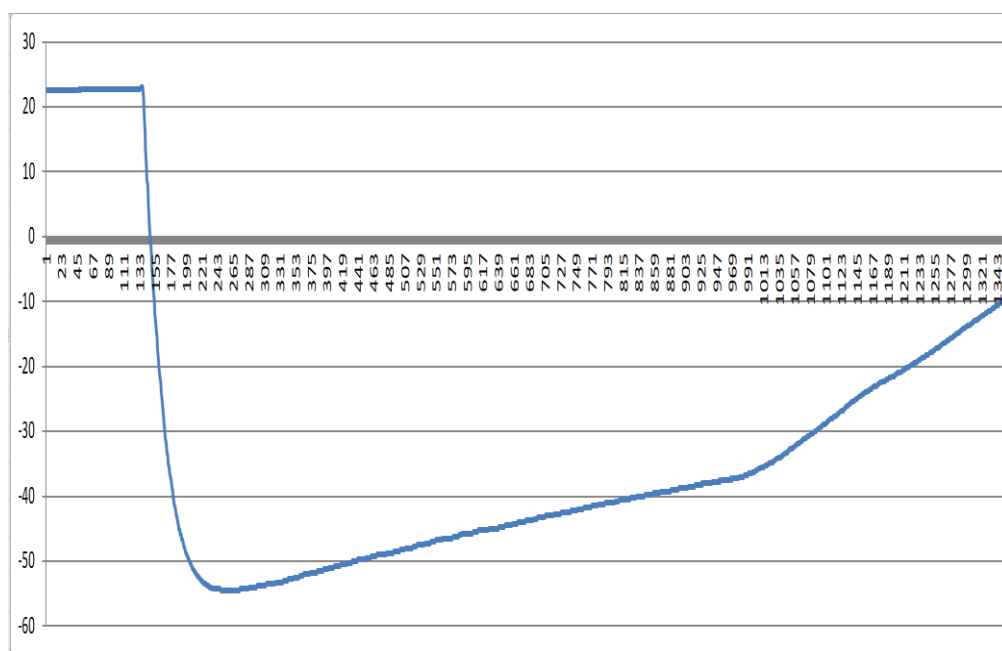


Рис. 4. График изменения температуры при запуске устройства в комнатной температуре (по вертикальной оси – значения температуры в градусах по Цельсию, по горизонтальной – время в секундах)

Fig. 4. Temperature change chart during device startup at room temperature (vertical axis – temperature values in degrees Celsius, horizontal axis – time in seconds)

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

Во втором эксперименте было принято решение производить запуск, предварительно охладив устройства в камере. Все устройства запустились нормально, но показания температурного датчика стали нелинейными. Среднее отклонение температуры составило 5 градусов по Цельсию (рис. 5).

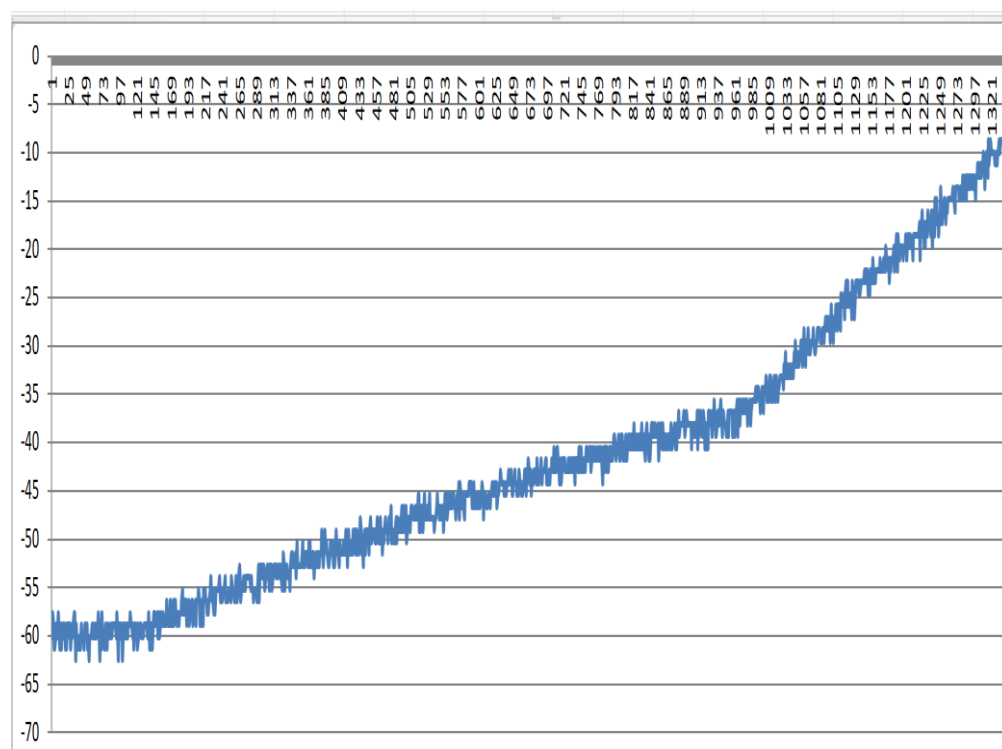


Рис. 5. График изменения температуры при запуске устройства в охлажденной камере (по вертикальной оси – значения температуры в градусах по Цельсию, по горизонтальной – время в секундах)

Fig. 5. Temperature change chart during device startup in a cooled chamber (vertical axis – temperature values in degrees Celsius, horizontal axis – time in seconds)

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

Оба эксперимента были повторены три раза и результаты оказались аналогичными.

Мы предполагаем, что такую ошибку может давать полупроводниковый диод в цепи измерения температуры. Планируется дальнейшее исследование его вольт-амперной характеристики в различных температурных условиях.

Также в эксперименте одно из устройств было покрыто специальным влагозащитным полимером, но его наличие не повлияло на результаты.

Обсуждение (Discussion)

По результатам исследования, можно утверждать, что выбранный серийный микроконтроллер и температурные датчики являются надежными компонентами, способными функционировать в экстремальных условиях, с некоторыми оговорками относительно отклонений в показаниях полупроводниковых датчиков. На основе полученных данных, вытекают следующие рекомендации для дальнейших исследований и практического применения:

1. Дальнейшие испытания при экстремальных температурах: Рекомендуется проведение дополнительных тестов на устойчивость микроконтроллеров и датчиков при температурах, находящихся за пределами современных испытаний, чтобы определить границы их эксплуатации и выявить возможные точки отказа.

2. Калибровка полупроводниковых датчиков: Введение программных решений для калибровки полупроводниковых датчиков с учетом отклонений, зафиксированных в ходе нашего эксперимента, позволит повысить точность и надежность систем, основанных на этих датчиках.

3. Исследование влияния внешних факторов: Так же необходимо уделить внимание изучению влияния внешних факторов, таких как влажность, давление, влияние магнитных полей на характеристики датчиков с покрытием и без, что даст более полное понимание их эксплуатационных возможностей.

4. Анализ долговечности и износостойкости: Для значительного повышения надежности применения датчиков и контроллеров в длительных и экстремальных условиях стоит рассмотреть возможность использования различных защитных покрытий конструкторских решений, а так же их влияние на долговечность компонентов.

Рекомендации могут послужить основой для дальнейших исследований, целью которых станет создание более точного и надежного измерительного оборудования, способного работать в условиях экстремально низких температур. Они также подчеркивают необходимость комплексного подхода к разработке промышленных систем, что в конечном итоге может привести к повышению их эффективности и долговечности в эксплуатации.

Заключение (Conclusions)

В ходе исследования были проанализированы современные методы противодействия негативным последствиям отрицательных температур для электроники. Результаты работы предоставляют ценные данные для дальнейшего использования полученной информации в тех областях, где стабильность работы оборудования при изменении климатических условий играет критическую роль.

По результатам эксперимента сделаны следующие выводы:

- выбранные серийные микроконтроллеры и температурные датчики демонстрируют высокую степень устойчивости к низким температурам, при этом не выходя из строя даже при значительных отклонениях от предельно допустимых значений, установленных производителем. Обнаруженные отклонения в температурном режиме в пределах 15-20 градусов Цельсия ниже указанной основаны на результатах испытаний, что говорит о значительном запасе прочности этих компонентов;

- разница в показаниях температурных датчиков с покрытием и без него оказалась незначительной. Выбранные датчики при наличии защитной пленки или без нее работают с высокой точностью и надежностью в необходимых нам условиях. Такой результат подчеркивает, что не всегда целесообразно использовать дополнительные защитные покрытия для достижения стабильности измерений. Однако стоит отметить, что отсутствие покрытия может указывать на снижение износостойкости в условиях длительного воздействия внешних факторов. Для более точной оценки целесообразности использования покрытия для повышения долговечности и устойчивости датчиков к внешним воздействиям необходимы дальнейшие исследования;

- при запуске полупроводникового температурного датчика в условиях низких температур обнаружены отклонения в среднем 5 градусов по Цельсию. В связи с этим следует вывод, что существует необходимость разработки методов коррекции и более точной калибровки для учета этого смещения.

Литература

1. X.K. Yu, Y.B. Tao, Preparation and characterization of paraffin/expanded graphite composite phase change materials with high thermal conductivity,(2022) International Journal of Heat and Mass Transfer, p. 123433 doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123433
2. Serbin, D. V., & Dmitriev, A. N. (2022). Experimental research on the thermal method of drilling by melting the well in ice mass with simultaneous controlled expansion of its diameter. Journal of Mining Institute, 257, 833-842. doi:10.31897/PMI.2022.82
3. Zhang N et al. (2020). Antarctic Subglacial Drilling Rig: Part IV. Electrical and Electronic Control System. Annals of Glaciology 1–12. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.40>
4. Shishkin, E. V., Bolshunov, A. V., Timofeev, I. P., Avdeev, A. M., & Rakitin, I. V. (2022). Model of a walking sampler for research of the bottom surface in the subglacial lake Vostok. Journal of Mining Institute, 257, 853-864. doi:10.31897/PMI.2022.53
5. Bolshunov, A. V., Vasilev, D. A., Ignatiev, S. A., Dmitriev, A. N., & Vasilev, N. I. (2022). Mechanical drilling of glaciers with bottom-hole scavenging with compressed air. [Механическое бурение ледников с очисткой забоя сжатым воздухом] *Led i Sneg*, 62(1), 35-46. doi:10.31857/S2076673422010114
6. Shilin Peng, Xiao Jiang, Yongzhen Tang, Chong Li, Xiaodong Li, Shengmiao Huang, Tianxin Zhu, Jianguang Shi, Youhong Sun, Pavel Talalay, Xiaopeng Fan, Nan Zhang, Bing Li, Da Gong and Haibin Yu (2021). Recoverable autonomous sonde for subglacial lake exploration: electronic control system design. Annals of Glaciology 62(85-86), 263–279. <https://doi.org/10.1017/aog.2021.1>
7. Pressure control method and device innovative design for deep oil in-situ exploration and coring Author links open overlay panel Nian-Han Wu, Ming-Zhong Gao, Liang-Yu Zhu, Jia-Nan Li, Dong Fan, Bin You, Wei Luo, Guo-Dong Zhu <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.10.011>.
8. Lee, Ian & Hawley, Robert & Bernsen, Steven; Campbell, Seth & Clemens-Sewall, David & Gerbi, Christopher & Hruby, Kate. (2019). A novel tilt sensor for studying ice deformation: application to streaming ice on Jarvis Glacier, Alaska. Journal of Glaciology. 66. 1-9. [10.1017/jog.2019.84](https://doi.org/10.1017/jog.2019.84).
9. Performance of a deep in situ pressure-preserving coring controller in a high-temperature and ultrahigh-pressure test system Xiaojun Shi a,b, Heping Xie a,b, Cong Li a,b*, Jianan Li a,b, Guikang Liu a,b, Zhenxi You b,c, Mingzhong Gao <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.01.012>
10. Sterkhov I.A. Kraev N. A., Denisova O. V Features of the Development of the Functional Units for Submersible Blocks of Downhole Telemetry Systems DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396635
11. Васильев, Н. И., А. Н. Дмитриев и П. А. Блинов (2012), Бурение глубокой скважины на российской антарктической станции Восток, Вестник ОНЗ РАН, 4, NZ2001, doi:10.2205/2012NZ000111.
12. Doyle, Samuel & Hubbard, Bryn & Christoffersen, Poul & Young, Tun Jan & Hofstede, Coen & Bougamont, Marion & Box, Jason & Hubbard, Alun. (2018). Physical Conditions of Fast Glacier Flow: 1. Measurements From Boreholes Drilled to the Bed of Store Glacier, West Greenland. Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 123. [10.1002/2017JF004529](https://doi.org/10.1002/2017JF004529).
13. Markov, Aleksey & Talalay, Pavel & Sysoev, Mikhail & Miller, Andrey; Cherepakhin, Alexander. (2021). Borehole multi-functional logger for geophysical high-precision monitoring in Antarctic and Greenland ice sheets and glaciers. Annals of Glaciology. 62. 1-11. [10.1017/aog.2021.17](https://doi.org/10.1017/aog.2021.17).
14. Mortensen, N., Goetz, J., Gibson, C., Johnson, J., & Shturmakov, A. (2014). Replicate ice-coring system architecture: Electrical, electronic and software design. Annals of Glaciology, 55(68), 156-164. doi:10.3189/2014AoG68A014
15. Moon, Sung In & Extrand, C..(2009). Water Vapor Permeation Resistance of Polycarbonate at Various Temperatures. Industrial & Engineering Chemistry Research – IND ENG CHEM RES. 48. [10.1021/ie900842t](https://doi.org/10.1021/ie900842t).
16. Исмоилов И.И., Грачева Е.И. Повышение управляемости энергетическими системами и улучшение качества электроэнергии // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. №1 (53). С. 3-12.
17. Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Альзакарр А., Низамиев М.Ф., Шумихина О.А., Valtchev S. Прогнозирование и анализ электропотребления и потерь электроэнергии на промышленных объектах. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022;24(6):3-12. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12>.
18. Bons, P., Jansen, D., Mundel, F. et al. Converging flow and anisotropy cause large-scale folding in Greenland’s ice sheet. Nat Commun 7, 11427 (2016). <https://doi.org/10.1038/ncomms11427>.
19. Петросянц К.О., Исмаил-Заде М.Р., Самбурский Л.М. Особенности моделирования ВАХ JFET-транзисторов в диапазоне криогенных температур // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 2. – С. 174–184. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-174-184

Авторы публикации

Растворова Ирина Ивановна – д-р техн. наук, доцент кафедры Электронных систем Санкт-Петербургского Горного университета. rastvorova@mail.ru

Смирнов Владимир Алексеевич – аспирант кафедры Электронных систем Санкт-Петербургского Горного университета. Vovsm1999@gmail.com

References

1. X.K. Yu, Y.B. Tao, Preparation and characterization of paraffin/expanded graphite composite phase change materials with high thermal conductivity,(2022) International Journal of Heat and Mass Transfer, p. 123433 doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123433
2. Serbin, D. V., & Dmitriev, A. N. (2022). Experimental research on the thermal method of drilling by melting the well in ice mass with simultaneous controlled expansion of its diameter. Journal of Mining Institute, 257, 833-842. doi:10.31897/PMI.2022.82
3. Zhang N et al. (2020). Antarctic Subglacial Drilling Rig: Part IV. Electrical and Electronic Control System. Annals of Glaciology 1–12. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.40>
4. Shishkin, E. V., Bolshunov, A. V., Timofeev, I. P., Avdeev, A. M., & Rakitin, I. V. (2022). Model of a walking sampler for research of the bottom surface in the subglacial lake Vostok. Journal of Mining Institute, 257, 853-864. doi:10.31897/PMI.2022.53
5. Bolshunov, A. V., Vasilev, D. A., Ignatiev, S. A., Dmitriev, A. N., & Vasilev, N. I. (2022). Mechanical drilling of glaciers with bottom-hole scavenging with compressed air. [Mekhanicheskoye bureniye lednikov s ochistkoy zaboya szhatym vozdukhom] Led i Sneg, 62(1), 35-46. doi:10.31857/S2076673422010114
6. Shilin Peng, Xiao Jiang, Yongzhen Tang, Chong Li, Xiaodong Li, Shengmiao Huang, Tianxin Zhu, Jianguang Shi, Youhong Sun, Pavel Talalay, Xiaopeng Fan, Nan Zhang, Bing Li, Da Gong and Haibin Yu (2021). Recoverable autonomous sonde for subglacial lake exploration: electronic control system design. Annals of Glaciology 62(85-86), 263–279. <https://doi.org/10.1017/aog.2021.1>
7. Pressure control method and device innovative design for deep oil in-situ exploration and coring Author links open overlay panel Nian-Han Wu, Ming-Zhong Gao, Liang-Yu Zhu, Jia-Nan Li, Dong Fan, Bin You, Wei Luo, Guo-Dong Zhu <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.10.011>.
8. Lee, Ian & Hawley, Robert & Bernsen, Steven; Campbell, Seth & Clemens-Sewall, David & Gerbi, Christopher & Hruby, Kate. (2019). A novel tilt sensor for studying ice deformation: application to streaming ice on Jarvis Glacier, Alaska. Journal of Glaciology. 66. 1-9. 10.1017/jog.2019.84.
9. Performance of a deep in situ pressure-preserving coring controller in a high-temperature and ultrahigh-pressure test system Xiaojun Shi a,b, Heping Xie a,b, Cong Li a,b*, Jianan Li a,b, Guikang Liu a,b, Zhenxi You b,c, Mingzhong Gao <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.01.012>
10. Sterkhov I.A. Kraev N. A., Denisova O. V Features of the Development of the Functional Units for Submersible Blocks of Downhole Telemetry Systems DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396635
11. Vasilyev, N. I., A. N. Dmitriev i P. A. Blinov (2012), Bureniye glubokoy skvazhiny na rossiyskoy antarkticheskoy stantsii Vostok, Vestnik ONZ RAN, 4, NZ2001 doi:10.2205/2012NZ000111.
12. Doyle, Samuel & Hubbard, Bryn & Christoffersen, Poul & Young, Tun Jan & Hofstede, Coen & Bougamont, Marion & Box, Jason & Hubbard, Alun. (2018). Physical Conditions of Fast Glacier Flow: 1. Measurements From Boreholes Drilled to the Bed of Store Glacier, West Greenland. Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 123. 10.1002/2017JF004529.
13. Markov, Aleksey & Talalay, Pavel & Sysoev, Mikhail & Miller, Andrey; Cherepakhin, Alexander. (2021). Borehole multi-functional logger for geophysical high-precision monitoring in Antarctic and Greenland ice sheets and glaciers. Annals of Glaciology. 62. 1-11. 10.1017/aog.2021.17.
14. Mortensen, N., Goetz, J., Gibson, C., Johnson, J., & Shturmakov, A. (2014). Replicate ice-coring system architecture: Electrical, electronic and software design. Annals of Glaciology, 55(68), 156-164. doi:10.3189/2014AoG68A014
15. Moon, Sung In & Extrand, C..(2009). Water Vapor Permeation Resistance of Polycarbonate at Various Temperatures. Industrial & Engineering Chemistry Research – IND ENG CHEM RES. 48.10.1021/ie900842t.
16. Ismoilov I.I., Gracheva E.I. Povyshenie upravlyaemosti energeticheskimi sistemami i uluchshenie kachestva elektroenergii // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. 2022. T. 14. №1 (53). S. 3-12.
17. Abdul lazyanov E.Yu., Gracheva E.I., Alzakkar A., Nizamiev M.F., Shumikhina O.A., Valtchev S. Prognozirovaniye i analiz elektropotrebleniya i potery elektroenergii na promyshlennyykh ob'yektakh. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. PROBLEMY ENERGETIKI. 2022;24(6):3-12.

<https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12>. 18. Bons, P., Jansen, D., Mundel, F. et al. Converging flow and anisotropy cause large-scale folding in Greenland's ice sheet. Nat Commun 7, 11427 (2016). <https://doi.org/10.1038/ncomms11427>.

19. Petrosyants K.O., Ismail-Zade M.R., Samburskiy L.M. Osobennosti modelirovaniya VAKH JFET-tranzistorov v diapazone kriogennykh temperatur // Izv. vuzov. Elektronika. – 2019. – T. 24. – № 2. – S. 174–184. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-174-184.

Authors of the publication

Irina I. Rastvorova – Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.
rastvorova@mail.ru

Vladimir A. Smirnov – Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.
Vovsm1999@gmail.com

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

Получено **10.01.2025 г.**

Отредактировано **01.02.2025 г.**

Принято **15.02.2025 г.**



**КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО
ОБОРУДОВАНИЯ ПО ВИБРАЦИОННЫМ ПАРАМЕТРАМ. ПРОВЕДЕНИЕ
ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ**

Басенко В.Р.

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

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* На сегодняшний день наиболее актуальным вопросом для работы промышленных электрических машин является энергоэффективность. Энергоэффективность оценивается по потребляемой электрической мощности. Но также эффективность работы промышленных электрических агрегатов можно оценить по другим критериям. В частности, применяя метод вибрационного контроля можно повысить энергоэффективность работы электрического двигателя, за счет устранения неисправностей. Повреждения электрических двигателей (дисбаланс, повреждение подшипников, несносность валов) приводит к увеличению электрических потерь, а следовательно, снижению энергоэффективности работы двигателей. Научная новизна данного исследования заключается в сопоставлении расчетных параметров вибрационных характеристик с действительными значениями экспериментальных данных промышленного вентилятора КХЕ200. Практическая значимость данного исследования заключается в применении прибора ВАСТ СД-23 для снижения уровня вибрации промышленной мельницы на основе встроенной подпрограммы прибор «Балансировка». *ЦЕЛЬ.* Целью данной работы является вибрационный контроль промышленного агрегата с проведением работ по балансировке рабочего диска его электрического привода. *МЕТОДЫ.* Применяется метод двухплоскостной балансировки вращающегося диска электрического привода промышленной мельницы. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Проведены измерения вибрации промышленной мельницы до и после процедуры балансировки со значительным снижением виброскорости работающего оборудования. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Динамическая балансировка промышленных агрегатов с электрическим приводом находит широкое применение для устранения дисбаланса, что приводит к значительному улучшению работы промышленного оборудования. Дисбаланс является одной из наиболее распространенных проблем, поэтому устранения дисбаланса является актуальной задачей в области неразрушающего контроля.

Ключевые слова: *вибрационные параметры; программное обеспечение «DREAM v.5»; динамическая балансировка; электрический двигатель.*

Для цитирования: Басенко В.Р. Контроль технического состояния промышленного оборудования по вибрационным параметрам. Проведение динамической балансировки для повышения эффективности работы оборудования // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 1. С. 27-36. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-27-36.

**CONTROL OF THE TECHNICAL CONDITION OF INDUSTRIAL EQUIPMENT BY
VIBRATION PARAMETERS. CARRYING OUT DYNAMIC BALANCING TO
INCREASE THE EFFICIENCY OF EQUIPMENT OPERATION**

Basenko V.R.

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

Abstract: *RELEVANCE.* Today, the most pressing issue for industrial electrical machines is energy efficiency. Energy efficiency is assessed by the consumed electrical power. But the

efficiency of industrial electrical units can also be assessed by other criteria. In particular, using the vibration monitoring method, it is possible to increase the energy efficiency of an electric motor by eliminating faults. Damage to electric motors (imbalance, bearing damage, shaft wear) leads to an increase in electrical losses, and, consequently, to a decrease in the energy efficiency of the motors. **THE PURPOSE.** The purpose of this work is vibration monitoring of an industrial unit with the implementation of work on balancing the working disk of its electric drive. The scientific novelty of this study lies in comparing the calculated parameters of vibration characteristics with the actual values of experimental data for the KXE200 industrial fan. The practical significance of this study lies in the use of the VAST SD-23 device to reduce the vibration level of an industrial mill based on the built-in subroutine of the Balancing device. **METHODS.** The method of two-plane balancing of the rotating disk of the electric drive of an industrial mill is used. **RESULTS.** Vibration measurements of the industrial mill were taken before and after the balancing procedure with a significant decrease in the vibration velocity of the operating equipment. **CONCLUSION.** Dynamic balancing of industrial units with an electric drive is widely used to eliminate imbalance, which leads to a significant improvement in the operation of industrial equipment. Imbalance is one of the most common problems, so eliminating imbalance is a pressing issue in the field of non-destructive testing.

Keywords: vibration parameters; software "DREAM v.5"; dynamic balancing; electric motor.

For citation: Basenko V.R. Control of the technical condition of industrial equipment by vibration parameters. Carrying out dynamic balancing to increase the efficiency of equipment operation. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (1): 27-36. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-27-36.

Введение (Introduction)

Для долговременной работы промышленного оборудования необходимо проводить контроль технического состояния для предотвращения потерь и поломок данного оборудования. Существует довольно большое количество методов контроля. Наиболее эффективными считаются методы неразрушающего контроля. Среди методов неразрушающего контроля одним из наиболее популярных является метод вибрационного контроля. Вибрационный контроль имеет широкий спектр применения, так как вибрацию (механические колебания около положения равновесия) испытывают практически все работающее промышленное оборудование. Основными параметрами, по которым осуществляется контроль технического состояния промышленного оборудования, являются следующие:

- виброперемещение (мм);
- виброскорость (мм/с);
- виброускорение (мм/с²).

Наиболее информативным является параметр виброскорости, так как он показывает изменение вибрационного состояния тела в зависимости от его энергетических характеристик, от внешнего механического воздействия. При этом вибрационный контроль сегодня может быть как контактным, так и бесконтактным, что также расширяет его область применения. Передовыми технологиями в области вибрационного контроля обладают сегодня производители VIBEX, ВАСТ, Dimrus. В России широкое применение сегодня находит оборудование для вибрационного контроля и диагностики производителя ВАСТ, а именно линейка приборов СД. Последняя версия прибора СД-23 широко применяется в энергетике и промышленности для проведения вибрационного контроля и диагностики вращающегося и стационарного оборудования. Граничные значения вибрационных параметров, контролируемых с помощью прибора СД-23, выделены на основе международных и национальных стандартов в области вибрационного контроля.

На основе измерений вибрации выносится заключение о работе промышленного оборудования. Руководящими документами здесь являются:

- ГОСТ 24346-80 Вибрация. Термины и определения;
- ГОСТ ИСО 10816-1-97 Межгосударственный стандарт. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования;
- ГОСТ ИСО 10816-3-2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15000 об/мин;

– ГОСТ 31350-2007 Вибрация. Вентиляторы промышленные. Требования к производимой вибрации и качеству балансировки.

Руководствуясь данными стандартами, были проведены измерения виброскорости промышленной мельницы с дальнейшей балансировкой ее рабочего диска.

Литературный обзор (Literature Review)

Вопросами вибродиагностики и контроля технического состояния сегодня занимается большое количество отечественных и зарубежных исследователей. Важным направлением здесь является вопросы вибродиагностики и дальнейшей балансировки ротора промышленных машин. Авторы Шостак, Гонг, Сердар, Алконз исследовали вопрос влияния дисбаланса ротора промышленных машин на энергоэффективность их работы [1-4]. В работе «IMPROVING THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF BALANCING ELECTRIC MACHINE ROTORS ON A BALANCING MACHINE» [1] автор резюмирует, что при возникновении дисбаланса, часть электрической энергии теряется в виде потерь на трение (вибрацию) и тепло. Данные явления приводят к снижению энергоэффективности и надежности работы промышленного агрегата. При проведении исследований эффективно проводить измерения на лабораторных стендах, прежде чем анализировать работающие промышленные агрегаты. Выявление вибрационных параметров на лабораторных стендах и их корреляционных связей рассмотрены в таких работах как «DESIGN OF LABORATORY DYNAMIC BALANCING DEVICE AND INVESTIGATION OF VIBRATIONS OF ROTATING BODIES» [3], а также «DESIGN & FABRICATION OF STATIC AND DYNAMIC VIBRATION BALANCING MACHINE» [5]. Продолжением данных исследований является вопрос компенсации неуравновешенных масс ротора. Данный вопрос рассмотрен исследователями Алексенцевой, Яковлевым, Лукьяновым и др. [6-8]. Решения задачи компенсации неуравновешенности масс ротора данными авторами сводятся к балансировке ротора в собственных опорах. Принципы балансировки ротора в собственных опорах представлены на рисунке 1.

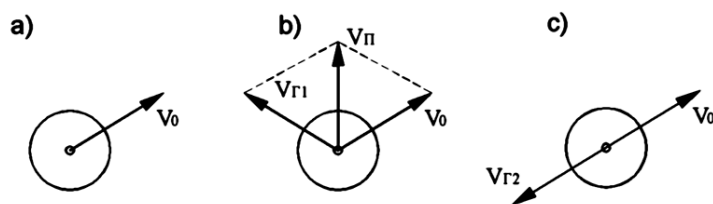


Рис. 1. Схема принципа балансировки ротора в собственных опорах

Fig. 1. Schematic diagram of the rotor balancing principle in its own supports

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

На рисунке 1 под пунктом а) изображена векторная диаграмма оборотной повышенной вибрации, под пунктом б) диаграмма направления виброскорости агрегата с добавлением пробного груза в произвольное место, под пунктом с) представленная векторная диаграмма виброскорости работающей машины с остаточным небалансом. Для снижения влияния небаланса на рабочую вращающуюся часть промышленного агрегата используется корректирующий груз. Задачами определения параметров корректирующего груза для динамической балансировки ротора в собственных опорах занимается автор Горбенко. В своей работе «АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ РОТОРА СО СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУРАВНОВЕШЕННОСТЯМИ» [10] исследователь приходит к выводу, что основными параметрами пробного и корректирующих грузов являются масса и радиус установки на рабочее тело машины. Также необходимо знать оборотную частоту, амплитуду и фазу виброскорости механических колебаний для корректного проведения динамической балансировки вращающейся машины [6, 10].

Дисбаланс можно обнаружить путем измерения виброскорости на подшипниковых опорах промышленной машины. Принято выбирать опоры, имеющие хорошую жесткую связь с вращающимся рабочим телом. При этом виброскорость определяется при рабочих оборотах машины для достоверности проведения диагностики.

Динамическая балансировка промышленного вентилятора

Проведена промышленная балансировка работающего вентилятора модели KXE200 производителя Werra Ventilatoren. Технические характеристики данного промышленного вентилятора приведены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1Технические характеристики промышленного вентилятора КХЕ200
Technical characteristics of the industrial fan KXE200

Тип вентилятора - КХЕ200	Данные по каталогу
Динамическое давление pd_2 , дПа	125
Динамическое давление pd_1 , дПа	66
Общий рост статичного давления, дПа	1940
Мощность на вале, кВт	132
Обороты ротора, 1/мин	2980
Рекомендуемая мощность мотора, кВт	160
Синхронное число оборотов двигателя, 1/мин	3000
Диаметр ротора, мм	1045
Окружная скорость, м/с	157
Количество лопастей	11
Масса без мотора КХЕ, кг	1194

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

Вентилятор модели КХЕ200 широко применяется на промышленных предприятиях благодаря своим техническим характеристикам. Он имеет две подшипниковые опоры, которые необходимо контролировать (рис. 2).

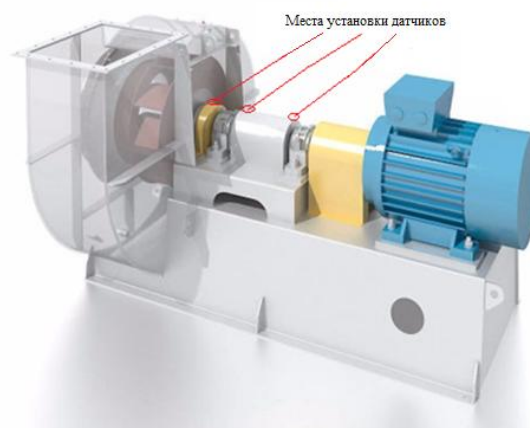


Рис. 2. Конструкция агрегата и место установки сенсоров системы вибродиагностики
Fig. 2. Unit design and installation location of vibration diagnostics system sensors

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

Использован прибор для измерений СД-23 компании ВАСТ, имеющий специализированное программное обеспечение для проведения работ по измерению, анализу, проведению наладочных работ в области вибродиагностики. Приборный комплекс изображен на рисунке 3.



Рис. 3. Приборный комплекс ВАСТ СД-23
Fig. 3. Instrument complex VAST SD-23

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

Алгоритм проведения 2-х плоскостной балансировки с помощью СД-23 имеет следующую последовательность:

1. Размечается балансировочная плоскость.
 2. Произвольно выбирается нулевая точка для начала отчета и измерения числа оборотов вращения балансируемого агрегата.
 3. Датчики измерительного комплекса устанавливаются в одну из плоскостей (подшипниковых опор, показанных на рисунке 3) для измерения виброскорости.
 4. Измеряется уровень виброскорости и сравнивается с референсными значениями (в данном случае со стандартами: ГОСТ ИСО 10816-3-2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15000 об/мин., ГОСТ 31350-2007 Вибрация. Вентиляторы промышленные. Требования к производимой вибрации и качеству балансировки).
 5. Запускается агрегат.
 6. Измеряется амплитуда и фаза оборотной вибрации.
 7. Измеряется частота вращения.
 8. Добавляется пробный рассчитанный пробный груз в нулевую точку на известный радиус.
 9. Измеряется фаза и амплитуда вибрации после внесения пробного груза.
 10. Добавляются корректирующие массы.
 11. При снижении вибрации до допустимых значений балансировка завершается.
- Расчет параметров пробной массы производится по следующему выражению:

$$M_{пр} = 804 * ((P * A) / (R * N)) \quad (1)$$

где $M_{пр}$ – масса пробного груза (г);

P – масса ротора (кг);

A – измеренная амплитуда вибрации (мм/с);

R – радиус установки пробного груза в балансировочной плоскости;

N – число оборотов ротора (об/мин).

Расчет параметров остаточной вибрации производится по следующему выражению:

$$A_{ост} = A_o + M_1 * K_1 \quad (2)$$

где $A_{ост}$ – вектор остаточной вибрации в точке A (мм/с);

A_o – вектор исходной вибрации в точке A (мм/с);

M_1 – внесенная масса;

K_1 – поправочный коэффициент.

Число масс и поправочных коэффициентов зависит от вида балансировки, количества плоскостей, точек и направлений вибрации [11-18].

Результаты проведения балансировки промышленной мельницы

В рамках данного исследования проводилась балансировка и вибрационный контроль промышленной мельницы КХЕ200 для повышения энергоэффективности его работы и снижения общего уровня вибрации агрегата. Параметры процесса балансировки приведены в таблице 2.

Таблица 2

Table 2

Балансировка машины: промышленной мельницы КХЕ200

Machine Balancing: KXE200 Industrial Fan

Частота вращения	2 987 об/мин
Количество точек измерения:	2
Количество направлений измерения:	2
Количество плоскостей установки:	1

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

Контрольный замер вибрации на валу до балансировки – СКЗ виброскорости 13,5 мм/с. Способ крепления грузов – сварное соединение согласовано с главным технологом. Результаты при проведении балансировки представлены далее в таблицах.

Таблица 3
Table 3Пуск 0
Start 0

Точки измерения	В		Г	
	Амплитуда, мм/с	Фаза, градусы	Амплитуда, мм/с	Фаза, градусы
ППШ1	11.298	246	12.877	153
ППШ2	9.659	250	10.68	161

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

После нулевого пуска выявлена амплитуда виброскорости на оборотной частоте с наибольшим значением 12,877 мм/с со значением фазы 153 градуса. После этого был поставлен пробный груз массой 40 г на угол 0 градусов в балансировочной плоскости. Результаты измерений после установки пробного груза приведены в таблице 4.

Таблица 4
Table 4Пуск 1
Start 1

Точки измерения	В		Г	
	Амплитуда, мм/с	Фаза, градусы	Амплитуда, мм/с	Фаза, градусы
ППШ1	8.653	319	10.666	241
ППШ2	7.179	322	8.549	236

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

В результате установки пробного груза произошло смещение фазы механических колебаний по причине дисбаланса на 88 градусов со снижением амплитуды виброскорости на 2,21 мм/с. Так как получено снижение виброскорости, соответственно происходит компенсация дисбаланса. Дальнейшие расчеты корректирующих масс проведены в программе «Балансировка» в программном обеспечении прибора СД-23. Полученные результаты по расчету рекомендуемых масс приведены в таблице 5.

Таблица 5
Table 5Рекомендуемая массы на пуске 2
Recommended launch mass 2

Корректирующие плоскости	Корректирующая масса	
	Граммы	Градусы
М1	27.441	131

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

В итоге на сам агрегат удалось установить массу 30 г на угол 135 градусов, что является незначительным отклонением от рекомендуемых и не повлияет на результат балансировки. После установки корректирующей массы проведен пуск агрегата и измерены параметры вибрации, представленные в таблице 6.

Таблица 6
Table 6Пуск 2
Start 2

Точки измерения	В		Г	
	Амплитуда, мм/с	Фаза, градусы	Амплитуда, мм/с	Фаза, градусы
ППШ1	5.456	224	6.618	135
ППШ2	3.999	230	4.954	134

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

Полученные значения амплитуды вибрации свидетельствуют о продолжении снижения небаланса, ввиду уменьшения амплитуда виброскорости до оборотной частоты до 6, 62 мм/с. Далее рассчитаны параметры следующей корректирующей массы, представленные в таблице 7.

Таблица 7
Table 7

Рекомендуемая массы на пуске 3
Recommended launch mass 3

Корректирующие плоскости	Корректирующая масса	
	Граммы	Градусы
M1	16.635	31

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

В итоге, исходя из полученных значений для второй корректирующей массы, установлена масса 18 г на угол 30 градусов. Исходя из прогноза программы «Балансировка», данная масса должна стать заключительной для установки и позволит снизить уровень виброскорости ниже значения 2,3 мм/с, что соответствует допустимым границам по ГОСТ ИСО 10816-3-2002. Проведены измерения параметров вибрации на вентиляторе КХЕ200 с установленной второй корректирующей массой. Результаты представлены в таблице 8.

Таблица 8
Table 8

Пуск 3
Start 3

Точки измерения	В		Г	
	Амплитуда, мм/с	Фаза, градусы	Амплитуда, мм/с	Фаза, градусы
ППШ1	0.925	129	1.099	38
ППШ2	0.849	131	1.057	40

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

Полученные параметры вибрации (табл. 8) удовлетворяют требованиям международных стандартов. Балансировка завершена, достигнуты показатели по граничной зоне А, соответствующие требованиям ГОСТ. Далее произведен контрольный пуск вентилятора КХЕ200, значения СКЗ виброскорости составили 1,7 мм/с. Сводная информация по виброналадке в таблице 9.

Таблица 9
Table 9

Итоговые результаты балансировки
Final balancing results

№ п/п	Результаты измерений	СКЗ виброскорости, мм/с
1.	До балансировки	13,5
2.	После балансировки	1,7
3.	Допуск – зона А по ГОСТ	2,3

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

По итогу проведения балансировки промышленного вентилятора КХЕ200 можно заключить о снижении уровня виброскорости в 7,94 раза.

Заключение (Conclusions)

С помощью проведения вибрационного контроля и процедуры балансировки была повышена надежность и эффективность работы промышленной мельницы КХЕ200. В ходе работы были выбраны руководящие документы для проведения контроля технического состояния и балансировки, а именно «ГОСТ ИСО 10816-3-2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью

от 120 до 15000 об/мин», «ГОСТ 31350-2007 Вибрация. Вентиляторы промышленные. Требования к производимой вибрации и качеству балансировки».

При измерении СКЗ виброскорости на подшипниковой опоре контролируемого промышленного вентилятора было определено максимальное значение в 13,5 мм/с, что превышает допустимую норму более чем в 5 раз. Было принято решение о проведении двух плоскостной балансировки для устранения дисбаланса. В ходе проведения балансировки был установлен пробный груз массой 40 г. Затем в результате расчетов в программном обеспечении прибора СД-23 подпрограмме «Балансировка» были рассчитаны массы корректирующих грузов – 27 и 16 грамм, а также углы их установки – 131 и 31 градус соответственно. В итоге, при проведении контрольного измерения СКЗ виброскорости на подшипниковой опоре промышленного вентилятора КХЕ200 было получено значение в 1,7 мм/с, что на 35% ниже допустимого предела. В результате проведения вибрационного контроля и балансировки промышленного вентилятора КХЕ200 уровень вибрации был снижен почти в 8 раз, что подтверждает эффективность проведения контроля технического состояния по вибрационным параметрам. Данная работа была проведена с помощью диагностического оборудования лаборатории «Надежность и диагностика электрооборудования» Казанского государственного энергетического университета.

В рамках дальнейшего развития при проведении работ в данной области необходимо расширять спектр мощностей для контролируемого промышленного оборудования. Также большими перспективами для развития обладают исследования в области предиктивного анализа технического состояния промышленного оборудования, в том числе на основе измеренных и смоделированных вибрационных параметров.

Литература

1. Shostak Y. et al. IMPROVING THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF BALANCING ELECTRIC MACHINE ROTORS ON A BALANCING MACHINE //Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2024. – Т. 130. – №. 7.
2. Gong Y. et al. Dynamic resource allocation for virtual machine migration optimization using machine learning //arXiv preprint arXiv:2403.13619. – 2024.
3. Serdar H., Özçelik Z. Design of laboratory dynamic balancing device and investigation of vibrations of rotating bodies //Journal of Engineering Technology and Applied Sciences. – 2021. – Т. 6. – №. 1. – С. 9-21.
4. Alconz S. C. B., Zurita G. Designing and development of a dynamic vibration balancing machine for industrial applications //Revista Investigación & Desarrollo. – 2019. – Т. 19. – №. 1.
5. Bhelsekar P. et al. Design & fabrication of static and dynamic vibration balancing machine //International Research Journal of Engineering and Technology. – 2019. – Т. 6. – №. 2. – С. 2605-2607.
6. Алексенцева Ю. Б., Мигачева Г. Н. ДИНАМИЧЕСКАЯ БАЛАНСИРОВКА РОТОРОВ В СОБСТВЕННЫХ ОПОРАХ //Техническое регулирование в едином экономическом пространстве. – 2023. – С. 70-76.
7. Яковлев Л. П. БАЛАНСИРОВКА ГРЕБНЫХ ВИНТОВ //Современные проблемы логистики, экономики, управления в эпоху глобальных вызовов: сборник. – 2023. – С. 233.
8. Лукьянов А. В., Каимов Е. В. Повышение надежности вспомогательных машин электровозов на основе использования данных вибродиагностики //Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2023. – №. 2 (78). – С. 115-126.
9. Ключников А. В. КОНСТРУКТИВНЫЙ ОБЛИК СТЕНДА ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАССОИНЕРЦИОННОЙ АСИММЕТРИИ ДЛИННОМЕРНЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ //Надежность и качество сложных систем. – 2023. – №. 1 (41). – С. 106-117.
10. Горбенко А. Н., Шаратов А. С. АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ РОТОРА СО СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУРАВНОВЕШЕННОСТЯМИ //Керченского Государственного Морского Технологического Университета СЕРИЯ Морские Технологии. – С. 32.
11. Петров, Т. И. Стенд для измерения вращающего момента и частоты вращения синхронных двигателей с постоянными магнитами / Т. И. Петров, В. Р. Басенко // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике : Материалы XVII Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции, Казань, 20–22 октября 2022 года / Редколлегия: А.Г. Арзамасова (отв. редактор). – Казань: ООО "Издательство Фолиант", 2022. – С. 203-206. – EDN KVVYKDF.
12. Разработка макета мобильной установки заряда электротранспорта и стенда для проведения испытаний / А. Р. Сафин, А. Н. Цветков, Т. И. Петров [и др.] // Естественные и технические науки. – 2023. – № 7(182). – С. 138-145. – DOI 10.25633/ETN.2023.07.09. – EDN

NZWEGG.

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

14. Анализ технического уровня разработок в области мобильных зарядных установок для электротранспорта / А. Р. Сафин, В. Р. Басенко, М. Ф. Низамиев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 55-64. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-3-55-64. – EDN BJTZLX.

15. 3D модель силового трансформатора для исследования его технического состояния по вибрационным параметрам / В. Р. Басенко, М. Ф. Низамиев, И. В. Ившин, О. В. Владимиров // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 130-143. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143. – EDN TTLTLL.

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

17. 3D модель силового трансформатора для исследования его технического состояния по вибрационным параметрам / В. Р. Басенко, М. Ф. Низамиев, И. В. Ившин, О. В. Владимиров // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 130-143. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143. – EDN TTLTLL.

18. Tokarev I.S. Development of parameters for an industry-specific methodology for calculating the electric energy storage system for gas industry facilities // Journal of Mining Institute. 2024. p. EDN UIZSOQ.

Авторы публикации

Басенко Василий Романович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий». Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия. vasilybas123@mail.ru

References

1. Shostak Y. et al. IMPROVING THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF BALANCING ELECTRIC MACHINE ROTORS ON A BALANCING MACHINE //Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2024. – Т. 130. – No. 7.

2. Gong Y. et al. Dynamic resource allocation for virtual machine migration optimization using machine learning //arXiv preprint arXiv:2403.13619. – 2024.

3. Serdar H., Özçelik Z. Design of laboratory dynamic balancing device and investigation of vibrations of rotating bodies // Journal of Engineering Technology and Applied Sciences. – 2021. – Т. 6. – No. 1. – pp. 9-21.

4. Alconz S. C. B., Zurita G. Design and development of a dynamic vibration balancing machine for industrial applications //Revista Investigación & Desarrollo. – 2019. – Vol. 19. – No. 1.

5. Bhelsekar P. et al. Design & fabrication of static and dynamic vibration balancing machine //International Research Journal of Engineering and Technology. – 2019. – Vol. 6. – No. 2. – P. 2605-2607.

6. Aleksentseva Yu. B., Migacheva G. N . DYNAMIC BALANCING OF ROTORS IN THEIR OWN SUPPORTS // Technical regulation in a single economic space. - 2023. - P. 70-76.

7. Yakovlev L. P. BALANCING OF PROPELLERS // Modern problems of logistics, economics, management in the era of global challenges: collection. - 2023. - P. 233.

8. Lukyanov A. V., Kaimov E. V. Improving the reliability of auxiliary of electric locomotive machines based on the use of vibration diagnostics data // Modern technologies. System analysis. Modeling. - 2023. - No. 2 (78). - P. 115-126.

9. Klyuchnikov A. V. DESIGN OF A STAND FOR PRECISION DETERMINATION OF MASS-INERTIAL PARAMETERS ASYMMETRIES OF LONG BODIES BY THE DYNAMIC BALANCING METHOD // Reliability and quality of complex systems. - 2023. - No. 1 (41). – P. 106-117.

10. Gorbenko A. N., Sharatov A. S. ANALYSIS OF OSCILLATIONS OF A ROTATING ROTOR WITH STATIC AND DYNAMIC INEQUILIBRIUMS // Kerch State Marine Technological University SERIES Marine Technologies. – P. 32.

11. Petrov, T. . I. Stand for measuring torque and rotation frequency of synchronous motors with permanent magnets / T. I. Petrov, V. R. Basenko // Dispatching and control in electric power

engineering: Proceedings of the XVII All-Russian open youth scientific and practical conference, Kazan, 20– October 22, 2022 / Editorial Board: A.G. Arzamasova (responsible editor). – Kazan: OOO Izdatelstvo Foliant, 2022. – P. 203-206. – EDN KVKYKDF.

12. Development of a layout of a mobile electric transport charging unit and a test bench / A. R. Safin, A. N. Tsvetkov, T. I. Petrov [et al.] // Natural and technical sciences. - 2023. - No. 7 (182). - P. 138-145. - DOI 10.25633 / ETN.2023.07.09. - EDN NZWEGG.

13. Modeling the work equipment of a mobile charging unit for charging electric transport in order to confirm compliance with climatic and mechanical performance groups / T. I. Petrov, A. R. Safin, E. I. Gracheva [et al.] // Bulletin of MSTU. Proceedings of Murmansk State Technical University.– 2022. – Vol. 25, No. 4. – P. 365-377. – DOI 10.21443/1560-9278-2022-25-4-365-377. – EDN JILKEG.

14. Analysis of the technical level of developments in the field of mobile charging installations for electric transport / A. R. Safin, V. R. Basenko, M. F. Nizamiyev [et al.] // News of higher educational institutions. Problems of energy. - 2023. - V. 25, No. 3. - P. 55-64. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-3-55-64. – EDN BJTZLX.

15. 3D model of a power transformer for studying its technical condition based on vibration parameters / V. R. Basenko, M. F. Nizamiyev, I. V. Ivshin, O. V. Vladimirov // News of higher educational institutions. Problems of energy. - 2022 . – V. 24, No. 3. – P. 130-143. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143. – EDN TTLTLL.

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

17. 3D model of a power transformer for studying its technical condition by vibration parameters / V. R. Basenko, M. F. Nizamiyev, I. V. Ivshin , O. V. Vladimirov // News of higher educational institutions. Problems of energy. - 2022. - Vol. 24, No. 3. - P. 130-143. - DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-130- 143. – EDN TTLTLL.

18. Tokarev I.S. Development of parameters for an industry-specific methodology for calculating the electric energy storage system for gas industry facilities // Journal of Mining Institute. 2024. p. EDN UIZSOQ.

Authors of the publication

Vasily R. Basenko – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.
vasiliybas123@mail.ru

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

Получено **19.11.2024 г.**

Отредактировано **27.01.2025 г.**

Принято **29.01.2025 г.**

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.311.243

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-1-37-47

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ P&O И ANFIS ДЛЯ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Петров Т.И., Али Н.К., Петрова А.Р., Гибадуллин Р.Р.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
tobac15@mail.ru

Резюме: Фотоэлектрическая энергия зависит от преобразования солнечного света в электричество. В последние годы цена на оборудование для солнечной электростанции резко снизилась, что привело к увеличению генерации фотоэлектрической энергии в последние годы. И повышение эффективности работы панелей является самой большой проблемой в солнечной энергетике. **ЦЕЛЬ.** Разработать систему для максимизации выходной мощности фотоэлектрических панелей при изменении солнечного излучения и температурных условий. **МЕТОДЫ.** В этом исследовании сравниваются два метода, которые позволяют повысить эффективность работы фотоэлектрических модулей, за счет определения точки максимальной мощности, ANFIS и P&O. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В этой работе объясняется пошаговый процесс, моделирование и анализ возмущений и наблюдений с помощью ANFIS и P&O с использованием программного обеспечения MATLAB/Simulink. Метод P&O лучше работает в стабильных условиях, однако его эффективность резко падает при резких изменениях освещения. С другой стороны, ANFIS более устойчива к изменениям и способна адаптироваться к новым условиям, что делает ее более универсальным инструментом. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Таким образом, при выборе подхода к отслеживанию точки максимальной мощности стоит учитывать множество факторов, включая условия эксплуатации, доступные ресурсы и цели. Метод P&O является отличным решением для менее требовательных условий и простых установок, в то время как ANFIS предоставляет решения для более сложных и динамичных приложений. Главное, что стоит подчеркнуть, это необходимость глубокой оценки ситуации и выбора наиболее подходящего метода для конкретных условий. Определение правильной стратегии может значительно улучшить работу фотоэлектрических модулей и повысить их общую эффективность в рамках электротехнических комплексов.

Ключевые слова: методы для определения точки максимальной мощности; фотоэлектрическая энергия; математическое моделирование; солнечные панели.

Благодарности: Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

Для цитирования: Петров Т.И., Али Н.К., Петрова А.Р., Гибадуллин Р.Р. Сравнение методов P&O и ANFIS для отслеживания точки максимальной мощности фотоэлектрических модулей в составе электротехнических комплексов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 1. С. 37-47. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-37-47.

COMPARISON OF P&O AND ANFIS METHODS FOR MONITORING THE MAXIMUM POWER POINT OF PHOTOVOLTAIC MODULES IN ELECTRICAL COMPLEXES

Petrov T.I., Ali N.K., Petrova A.R., Gibadullin R.R.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
tobac15@mail.ru

Abstract: Photovoltaic energy depends on the conversion of sunlight into electricity. In recent years, the price of solar power plant equipment has dropped sharply, which has led to the increase of photovoltaic power generation in recent years. There is a trend of decreasing cost of solar panels and power plant equipment, and this has caused the increase of electricity generated from PV modules. **OBJECTIVE.** To develop a system to maximize the power output of PV panels under changing solar irradiance and temperature conditions. **METHODS.** This study compares two methods that can improve the working efficiency of PV modules by determining the maximum power point, ANFIS and P&O. **RESULTS.** This paper explains the step-by-step process, simulation and disturbance and observation analysis by ANFIS and P&O using MATLAB/Simulink software. The P&O method works better in stable conditions, but its effectiveness drops sharply with sudden changes in lighting. On the other hand, ANFIS is more resistant to changes and is able to adapt to new conditions, which makes it a more versatile tool. **CONCLUSION.** Therefore, when choosing an approach to MPP tracking, it is worth considering many factors, including operating conditions, available resources, and goals. The P&O method is an excellent solution for less demanding conditions and simple installations, while ANFIS provides solutions for more complex and dynamic applications. The main thing to emphasize is the need for a thorough assessment of the situation and the selection of the most suitable method for specific conditions. Determining the right strategy can significantly improve the performance of PV modules and increase their overall efficiency within electrical complexes.

Keywords: methods for determining the maximum power point; photovoltaic energy; mathematical modeling; solar panels.

Acknowledgments: The work was carried out at the expense of a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, provided to young candidates of science (postdoctoral students) for the purpose of defending a doctoral dissertation, carrying out research work, and also performing work functions in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan within the framework of the State Program of the Republic of Tatarstan "Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan."

For citation: Petrov T.I., Ali N.K., Petrova A.R., Gibadullin R.R. Comparison of P&O and ANFIS methods for monitoring the maximum power point of photovoltaic modules in electrical complexes. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (1): 37-47. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-37-47.

Введение (Introduction)

В последние годы наблюдается растущий интерес к солнечной энергетике. Эффективное использование солнечных фотоэлектрических модулей зависит не только от качества самих панелей, но и от технологий, применяемых для их управления.

Алгоритмы МРРТ предназначены для оптимизации работы фотоэлектрических модулей, позволяя им генерировать максимальное количество энергии в разных условиях. Основная задача этих алгоритмов заключается в отслеживании максимальной выходной мощности модуля, которая зависит от различных факторов, таких как солнечное излучение, температура, угол наклона панелей и другие [1-5].

Важно отметить, что работа алгоритмов МРРТ в значительной мере влияет на общую эффективность фотогальванических систем. Правильный выбор алгоритма позволяет минимизировать потери при преобразовании солнечной энергии в электрическую [6, 7].

Особое внимание уделяется алгоритмам отслеживания точки максимальной мощности (МРРТ), среди которых метод Perturb and Observe (P&O) и адаптивная нечёткая инференс-система (ANFIS) занимают важные места [8-10]. В данной статье мы рассмотрим

архитектуру и работу этих алгоритмов, их сравнительные характеристики, а также процесс моделирования в MATLAB.

Метод Р&О основывается на периодическом измерении возмущения выходной мощности модуля, что позволяет отслеживать изменения в условиях освещения и температуры. При каждом изменении состояния система сравнивает текущую мощность с предыдущей, определяя, нужно ли увеличить или уменьшить напряжение для достижения максимальной генерации энергии. Этот метод прост в реализации, но может давать колебания около точки максимальной мощности, особенно в условиях быстро меняющейся солнечной активности [11].

В свою очередь, ANFIS использует комбинацию нейронных сетей и нечеткой логики для более точного прогнозирования и отслеживания МРРТ. Система обучается на основе исторических данных, что позволяет ей адаптироваться к изменениям во внешней среде и оптимизировать процесс максимально эффективно. Этот подход обеспечивает значительное улучшение в стабильности и скорости регулирования, особенно в условиях изменчивого освещения [12].

Научной значимостью предлагаемой статьи является изучение тенденции в методах отслеживания точки максимальной мощности, моделирование двух основных методов. Практическая значимость заключается в сравнении методов, с выбором наиболее эффективного.

Отличие представленной работы от результатов исследований, проводимых российскими и зарубежными учеными, заключается в реализации работы двух методов в программе Matlab (Simulink), с описанием алгоритмов работы.

Материалы и методы (Materials and methods)

Точка максимальной мощности – это значение напряжения и тока, при которых солнечные панели выдают максимальную энергию. Эта точка зависит от различных факторов, включая уровень солнечного освещения, температуру и характеристики самой панели. Оптимизация работы панелей для достижения максимальной мощности требует неустанного мониторинга условий окружающей среды и быстрого реагирования на изменения.

На рисунке 1 представлена спецификация рассматриваемых фотоэлектрических панелей и модулей.

Parameter	Value
Maximum power (W)	305.226
Voltage at maximum power (V_{mp})	54.7 V
Current at maximum power (I_{mp})	5.58 A
Open circuit voltage (V_{oc})	64.2 V
Short circuit current (I_{sc})	5.96 A
Total no.of cells in series (N_s)	5
Total no.of cells in parallel (N_p)	66
Temperature coefficient of V_{oc} (K_v)	-272.7 mV/°C
Temperature coefficient of I_{sc} (K_i)	61.745 mA/°C
Diode saturation current (I_0)	6.3076×10^{-12} A
Parallel resistance (R_p)	393.2054 Ω .
Series resistance (R_s)	0.37428 Ω
Maximum power (kW) (PV array)	100 KW
Voltage at maximum power (V_{mp}) (PV array)	273.5 V
Current at maximum power (I_{mp}) (PV array)	368.28 A
Open circuit voltage (V_{oc}) (PV array)	321 V
Short circuit current (I_{sc}) (PV array)	399.432 A

Рис. 1. Спецификация фотоэлектрических панелей и модулей

Fig. 1. Specification of photovoltaic panels and modules

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

Алгоритм возмущения и наблюдения (Р&О) – это процедура, в которой переменная изменяется (возмущается), а влияние изменения на другую переменную отслеживается (наблюдается) [13]. Чтобы определить, увеличивается или уменьшается мощность, изменяется напряжение фотоэлектрического модуля.

Один из основных факторов, способствующих популярности метода Р&О, заключается в его простоте и относительной дешевизне. Он не требует сложного оборудования и алгоритмов, что делает его доступным для большинства электротехнических комплексов. Кроме того, метод Р&О способен быстро реагировать на изменения условий окружающей среды, что позволяет оперативно находить точку максимальной мощности [14]. Именно этот аспект делает его подходящим для использования в реальных условиях.

Несмотря на свои преимущества, метод Р&О имеет и недостатки. Наиболее значительным из них является его склонность к «плаванию» в точке максимальной мощности, особенно в условиях переменных уровней солнечного света. Когда облака закрывают солнце или возникают другие изменения в условиях, система может не успеть адаптироваться, что может привести к потерям в выходной мощности [15]. Также стоит отметить, что в условиях быстро меняющихся параметров, метод Р&О может приводить к неэффективному использованию ресурсов, так как он требует постоянного изменения рабочего режима для нахождения максимума. Алгоритм работы представлен в виде блок-схемы (рис. 2).

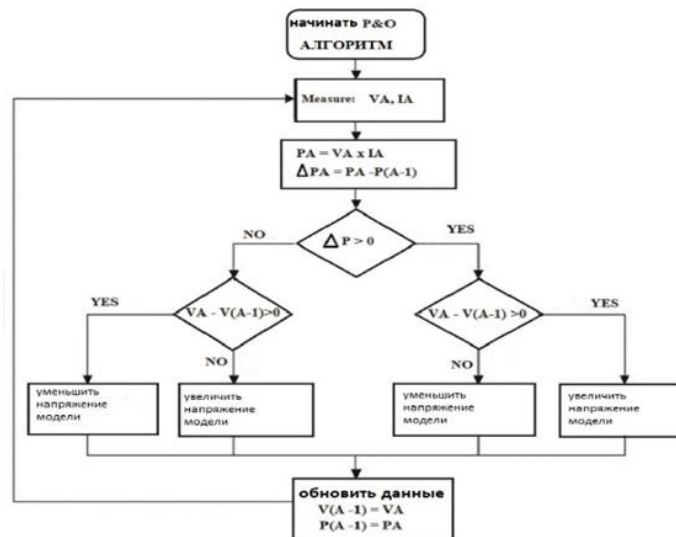


Рис. 2. Блок-схема алгоритма Р&О

Fig. 2. P&O Algorithm Flowchart

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

ANFIS – это адаптивная система нейро-нечеткого вывода, которая использует 5-слойную нейронную сеть MLP для уточнения нечетких правил, уже установленных экспертами-людьми, и способна скорректировать перекрытие между различными нечеткими подмножествами для описания поведения ввода-вывода сложной системы с использованием базы данных для обучения [16-18]. Алгоритм сочетает в себе преимущества двух машинных методов обучения, методов искусственного интеллекта (Fuzzy Логика и нейронная сеть). В этой системе нечеткая логика преобразует входные данные в желаемый результат с помощью высокоэффективной взаимосвязанной нейронной сети, взвешенная для отображения цифрового входа на выход. Как показано на рисунке 3, эта сеть, которая представляет собой решение системы нечеткого уравнения Такаги-Сугено Канга, системы вывода (FIS) и искусственная нейронная сеть, которая имеет структуру, состоящую из пяти слоев. Квадратные узлы представляют собой адаптивные части, а круговые узлы представляют собой неадаптивные секции. Параметры адаптивных узлов будут изменены в ходе процесс обучения ANFIS. Обучение осуществляется за счет гибридного метода, основанного на принципе обратного распространения ошибки и метода наименьших квадратов. Роль обучения заключается в настройке параметров этой системы нечеткого вывода, эта модель дает очень хорошие результаты аппроксимации для нелинейных функций.

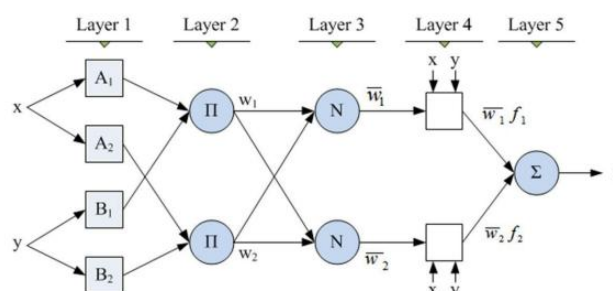


Рис. 3. Структура работы нейронной сети ANFIS

Fig. 3. The structure of the ANFIS neural network

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

Впоследствии гибридный алгоритм обучения, который сочетает в себе алгоритм обучения обратного распространения ошибки и метод наименьших квадратов, используется для определения оптимальных значений параметров этих функций принадлежности и последовательных параметров. Эти последовательные параметры используются для определения выходных данных сети ANFIS. Используется экспериментальная база данных, собранная на солнечной фотоэлектрической станции.

Для моделирования в рамках PSC данные обучения получаются путем моделирования фотоэлектрического модуля и измерения параметров. Система обучена в течение 10 эпох, и полученная ошибка обучения равна $1,7 \cdot 10^{-7}$. На рисунке 4 показана блок-схема реализации MPPT на основе ANFIS, на рисунках 5-6 – модель в Matlab (Simulink).

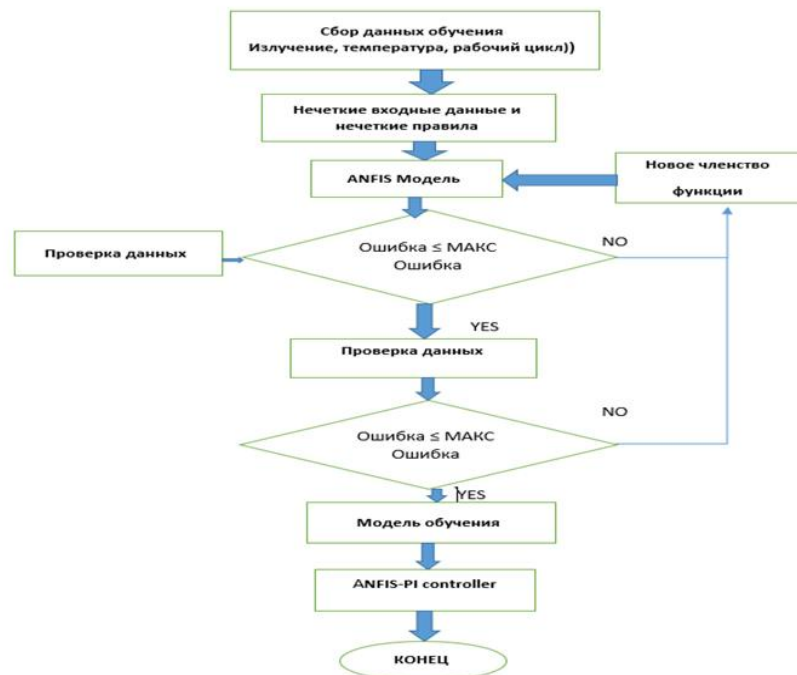


Рис. 4. Блок-схема алгоритма ANFIS

Fig. 4. ANFIS Algorithm Flowchart

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

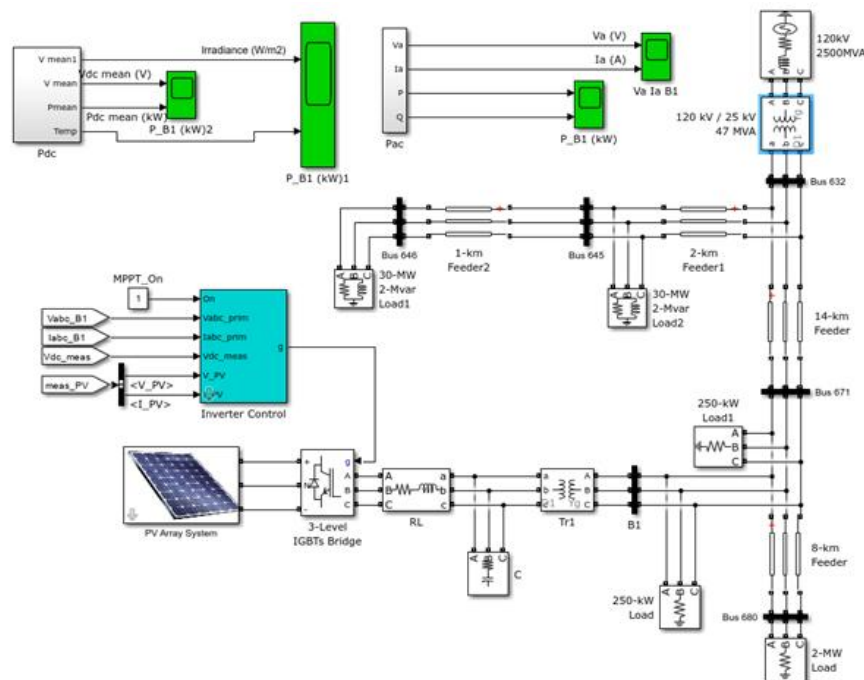


Рис. 5. Модель системы, разработанная в Simulink

Fig. 5. System model developed in Simulink

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

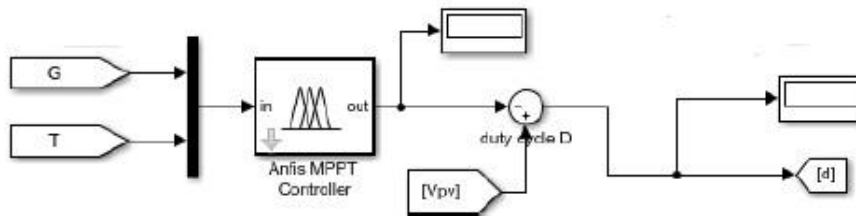


Рис. 6. Модель системы блока ANFIS, Fig. 6. System model ANFIS developed in Simulink разработанная в Simulink

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

Обсуждение результатов (Discussions and Results)

MATLAB предоставляет мощную платформу для моделирования систем МРРТ. Перед началом моделирования необходимо определить основные параметры модуля, такие как выходное напряжение, ток и условия окружающей среды. Важно учитывать, что все входные значения должны быть актуальными для реальных условий.

Для реализации алгоритма Р&О в MATLAB необходимо создать цикл, который будет периодически вычислять и обновлять выходные параметры. Программный код должен включать:

- Инициализацию переменных для хранения данных.
- Цикл, в котором осуществляется периодическая выборка напряжения и тока.
- Вычисление мощности.
- Логика возмущения напряжения в зависимости от изменения мощности.

Пример кода на MATLAB:

```
% Инициализация переменных
V = 0; % Напряжение
I = 0; % Ток
P_old = 0; % Старая мощность
dp = 0.1; % Изменение напряжения
while true
    % Измерение напряжения и тока
    V = measureVoltage(); % Замеры
    I = measureCurrent(); % Замеры

    P = V * I; % Мощность
    if P > P_old
        V = V + dp; % Увеличение напряжения
    else
        V = V - dp; % Уменьшение напряжения
    end
    P_old = P; % Сохранение старой мощности
end
```

Для реализации ANFIS в MATLAB необходимо предварительно обучить модель, используя набор данных, содержащий различные сценарии работы модуля. В MATLAB существует функционал для создания и обучения ANFIS-моделей.

Примерный алгоритм выглядит следующим образом:

– Подготовка датасета из чисел, отражающих параметры работы модуля в различных условиях.

- Создание нечёткой системы с подмножествами для всех входных переменных.
- Обучение модели на предоставленном датасете.

Пример кода на MATLAB:

```
% Подготовка данных
data = load('dataset.mat'); % Загрузка данных
inputs = data(:, 1:2); % Температура и освещенность
outputs = data(:, 3); % Мощность
% Создание и обучение ANFIS
fis = genfis1([inputs, outputs], 10, 'gbellmf', 'constant');
anfisModel = anfis([inputs, outputs], fis).
```

Модель MATLAB/Simulink для алгоритма ANFIS и Р&О была спроектирована, разработана и проверена в различных условиях.

На рисунках 7-8 представлены результаты моделирования для обоих методов.

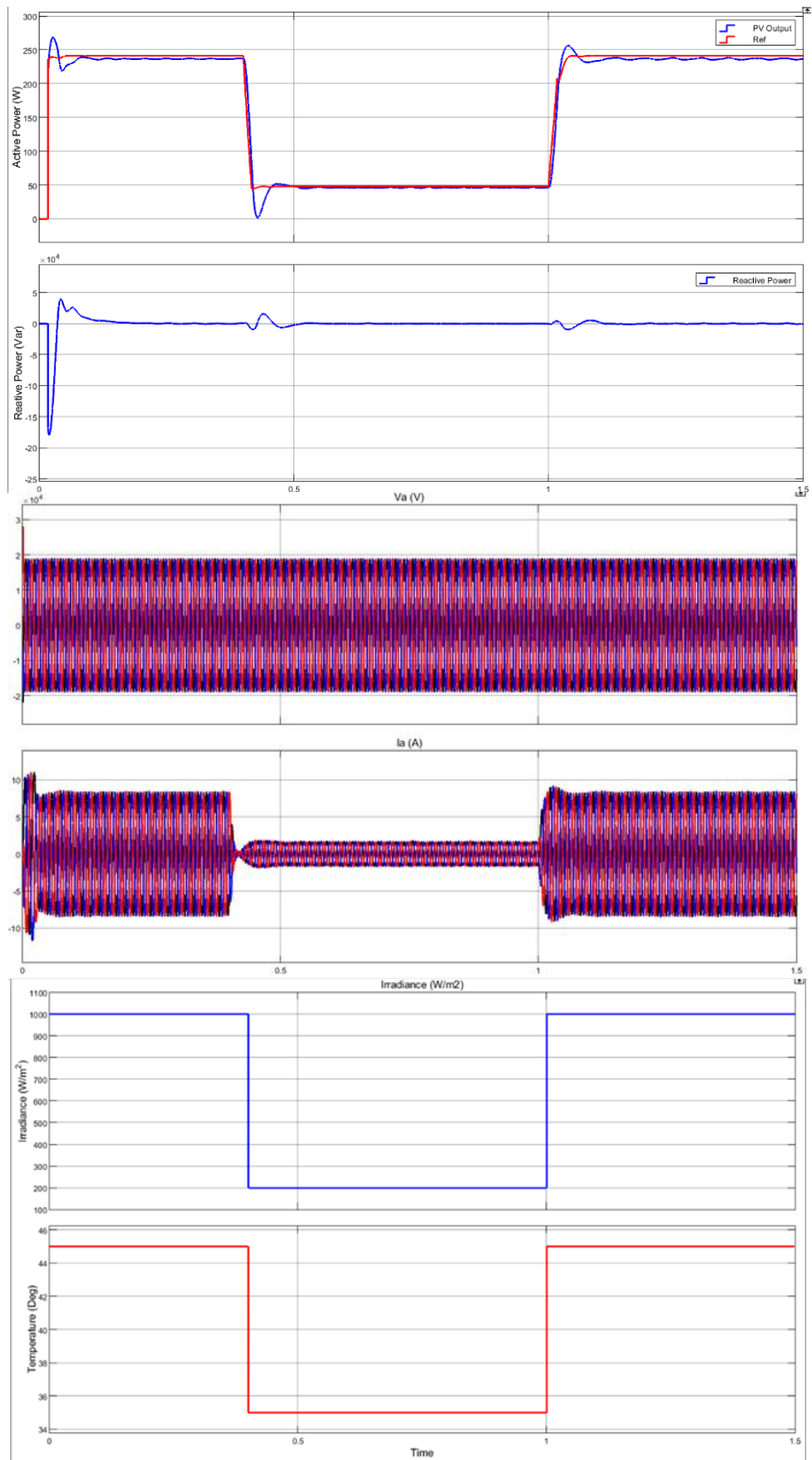


Рис. 7. Графики параметров фотоэлектрической батареи (P&O) Fig. 7. Photovoltaic array parameter graphs (P&O)

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

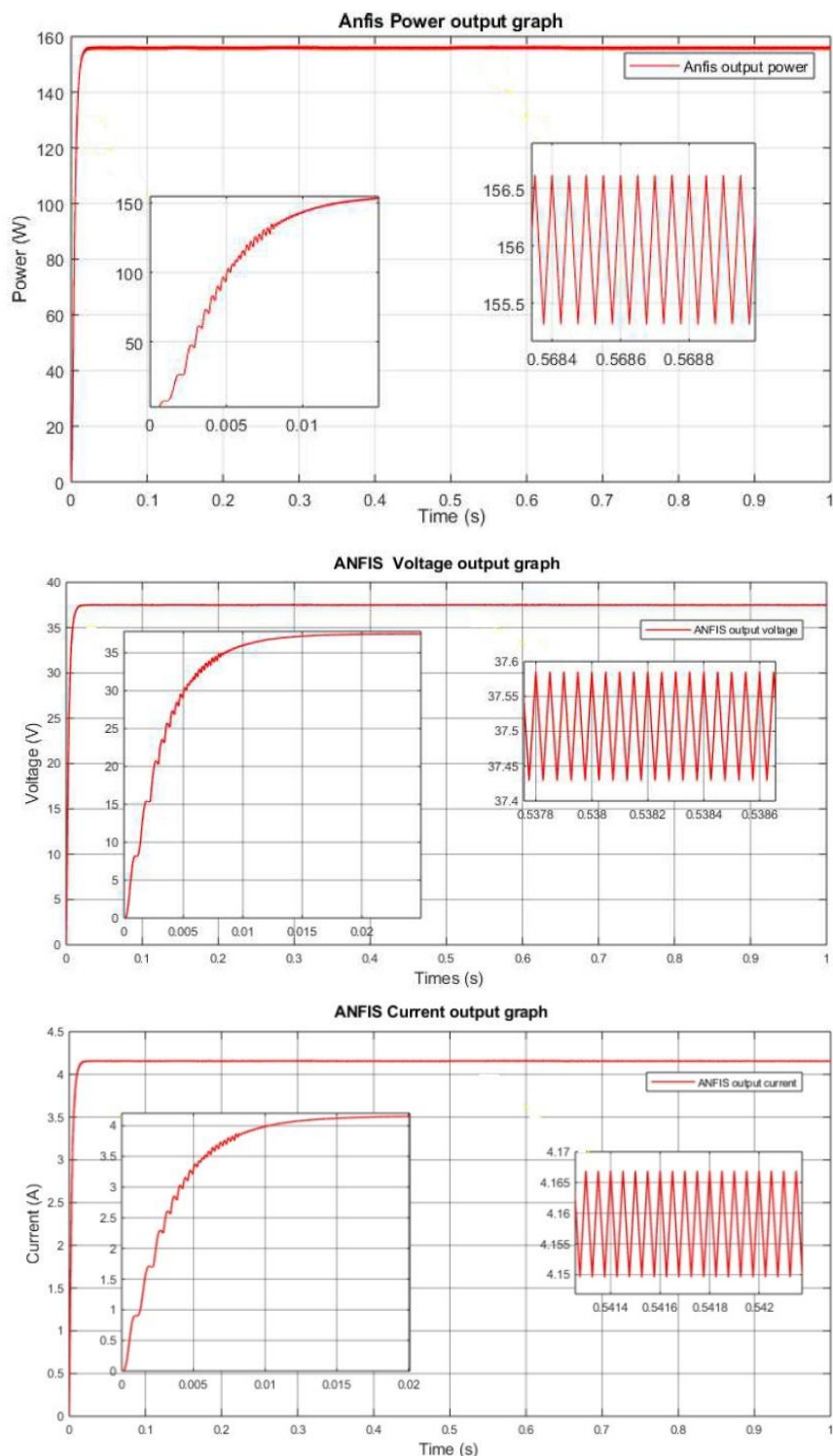


Рис. 8. Графики параметров фотоэлектрической батареи (ANFIS) *Fig. 8. Photovoltaic array parameter graphs (ANFIS)*

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

Результаты, представленные в этой статье, показывают, что метод ANFIS очень быстр и точен в поиске и отслеживании MPP в случае быстрого изменения солнечного излучения. Кроме того, этот метод может стабильно извлекать точку максимальной мощности при медленном изменении солнечного излучения. Напротив, когда излучение быстро меняется за короткое время, метод Р&О не может эффективно отслеживать MPP. Кроме того, этот метод имеет высокие колебания вокруг MPP при медленном изменении солнечного излучения, что приводит к высоким потерям мощности в долгосрочной перспективе.

В настоящей работе представлены адаптивные нейро-нечеткие системы вывода, основанные на трекерах максимальной мощности для фотоэлектрической системы.

Представленный алгоритм прост и дает выгодное решение при изменяющихся условиях окружающей среды. Результаты моделирования показали, что ANFIS может отслеживать максимальную мощность, имея меньшее время установления при различных сценариях затенения. Сравнительный анализ ANFIS и P&O установил превосходство алгоритма ANFIS.

Выводы (Conclusions)

Исследование содержит результаты применения MPPT с целью повышения мощности батареи 17 кВт. Моделирование производилось для стандартных условий работы фотоэлектрических модулей. Сравнивались 2 метода P&O, ANFIS, рассмотрены принципы работы, алгоритмы. Для моделирования использовалось ПО Matlab, подпрограмма Simulink, где при помощи готовых модулей были разработаны модели фотоэлектрической станции, с использованием методов MPPT.

Работа алгоритмов P&O и ANFIS для отслеживания точки максимальной мощности фотоэлектрических модулей демонстрирует различные подходы к повышению эффективности солнечных систем. Каждому алгоритму присущи свои преимущества и недостатки, и выбор зависит от специфики задачи и условий эксплуатации.

Для P&O было получено, что данный метод эффективен при работе в значениях, близких к MPP, хоть и наблюдаются незначительные колебания. Также стоит отметить, что наилучший результат работы метода достигался не при динамических, а статических условиях. Результаты моделирования работы ANFIS показывают, что метод более стабилен при динамических условиях, определяет MPP точнее и быстрее, и имеет меньшие колебания. Таким образом, можно сказать, что алгоритм ANFIS более перспективен для повышения эффективности работы фотоэлектрических модулей.

Таким образом, понимание работы алгоритмов MPPT и их внедрение в практику являются ключевыми для достижения высоких показателей эффективности в области солнечной энергетики.

Литература

1. Liu F., Duan S., Liu B., and Kang Y. A variable step size INC MPPT method for PV systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 7, pp. 2622–2628, Jul. 2008.
2. Tyagi V. V., Rahim N. A. A., Rahim N. A., and Selvaraj J. A. L. Progress in solar PV technology: research and achievement // Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 20, pp. 443–461, 2013.
3. Mehmet Y. and Muhammedfatih C.. PSO Training Neural Network MPPT With CUK Converter Topology for Stand-Alone PV Systems Under Varying Load and Climatic Conditions // Türk Doğa Ve Fen Dergisi, vol. 13, no. 1, 2024, pp. 88-97.
4. Khan MJ, Pushparaj. A novel hybrid maximum power point tracking controller based on artificial intelligence for solar photovoltaic system under variable environmental conditions // Journal of Electrical Engineering & Technology. 2021; 16(4), 1879-1889.
5. Padmavathi N, Chilambuchelvan A, Shanker NR. Maximum power point tracking during partial shading effect in PV system using machine learning regression controller // Journal of Electrical Engineering & Technology. 2021; 16, 737-748.
6. Basha CH, Murali M. A new design of transformerless, non-isolated, high step-up DC-DC converter with hybrid fuzzy logic MPPT controller // International Journal of Circuit Theory and Applications. 2022; 50(1), 272-297.
7. Гибадуллин, Р. Ф. Организация защищенной передачи данных в сенсорной сети на базе микроконтроллеров AVR // Кибернетика и программирование. 2018. № 6. С. 80-86.
8. Нуриев М. Г., Гизатуллин Р.М., Мухамадиев А.А. Исследование помехоустойчивости вычислительной техники при электромагнитных воздействиях через металлоконструкцию здания на основе физического моделирования // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 4. С. 10.
9. Петров Т.И., Сафин А.Р., Низамиев М.Ф., Басенко В.Р. Применение генетического алгоритма при разработке программного обеспечения для перебора материалов при оптимизации синхронных двигателей // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14, № 2(54). – С. 96-105.
10. Safin A., Kopylov A., Gibadullin R., Petrov T., Khusnutdinov R., Fedorov O. Thermal Model of a Linear Electric Machine // 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia, 2019, pp. 426-428.
11. Сафин А.Р., Ившин И.В., Грачева Е.И., Петров Т.И. Разработка математической модели автономного источника электроснабжения с свободно-поршневым двигателем на базе синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 38-48.

12. Tabachnikova T. V., Gracheva E. I., Naumov O. V., et al. Forecasting technical state and efficiency of electrical switching devices at electric complexes in oil and gas industry // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Almet'yevsk, Republic of Tatarstan, 2020. P. 012014.
13. Gracheva E., Toshkhodzhaeva M., Rahimov O., Dadabaev S., et. al. Modeling the Reliability of High-Voltage Power Transmission Lines Taking into Account the Influence of the Parameters of a Sharply Continental Climate // International Journal of Technology, 2020, vol. 11, iss. 8, 2020, P. 1557-1569.
14. Khan MJ, Pushparaj. A novel hybrid maximum power point tracking controller based on artificial intelligence for solar photovoltaic system under variable environmental conditions // Journal of Electrical Engineering & Technology. 2021; 16(4), 1879-1889.
15. Yılmaz M, Kaleli A, Çorapsız MF. Machine learning based dynamic super twisting sliding mode controller for increase speed and accuracy of MPPT using real-time data under PSCs // Renewable Energy. 2023; 219, 119470
16. Aygül K, Cikan M, Demirdelen T, Tumay M. Butterfly optimization algorithm based maximum power point tracking of photovoltaic systems under partial shading condition // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2023; 45(3), 8337-8355.
17. Bouarroudj N, Benlahbib B, Houam Y, Sedraoui M, Batlle VF, Abdelkrim T, et al. Fuzzy based incremental conductance algorithm stabilized by an optimal integrator for a photovoltaic system under varying operating conditions // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2021; 1-26.
18. Tokarev I.S. Development of parameters for an industry-specific methodology for calculating the electric energy storage system for gas industry facilities // Journal of Mining Institute. 2024. p. EDN UIZSOQ.

Авторы публикации

Петров Тимур Игоревич – доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия.

Али Нисрин Карим – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия.

Петрова Анастасия Руслановна – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия.

Гибадуллин Рамил Рифатович – заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия.

References

1. Liu F, Duan S, Liu B, and Kang Y. A variable step size INC MPPT method for PV systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008; 55(7):2622–2628.
2. Tyagi VV, Rahim NAA, Rahim NA, and Selvaraj JAL. Progress in solar PV technology: research and achievement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013; 20:443– 461.
3. Yılmaz M, Corapsiz M. PSO Training Neural Network MPPT with CUK Converter Topology for Stand-Alone PV Systems Under Varying Load and Climatic Conditions. *TJNS*. 2024; 13(1):88–97.
4. Khan MJ, Pushparaj. A novel hybrid maximum power point tracking controller based on artificial intelligence for solar photovoltaic system under variable environmental conditions. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2021; 16(4):1879-1889.
5. Padmavathi N, Chilambuchelvan A, Shanker NR. Maximum power point tracking during partial shading effect in PV system using machine learning regression controller. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2021; 16, 737-748.
6. Basha CH, Murali M. A new design of transformerless, non-isolated, high step-up DC-DC converter with hybrid fuzzy logic MPPT controller. *International Journal of Circuit Theory and Applications*. 2022; 50(1), 272-297.
7. Gibadullin RF. Organization of secure data transmission in a sensor network based on AVR microcontrollers. *Cybernetics and Programming*. 2018;6:80-86.

8. Nuriev MG, Gizatullin RM, Mukhamadiev AA. Study of the noise immunity of computer technology under electromagnetic influences through the metal structure of a building based on physical modeling. *Journal of Radio Electronics*. 2019;4:10.
9. Petrov TI, Safin AR, Nizamiev MF, Basenko VR. Application of genetic algorithm in development of software for material selection in optimization of synchronous motors. *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*. 2022;14,2(54):96-105.
10. Safin A., Kopylov A., Gibadullin R., Petrov T., Khusnutdinov R., Fedorov O. Thermal Model of a Linear Electric Machine. *2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia*. 2019:8 426-428.
11. Safin A.R., Ivshin I.V., Gracheva E.I., Petrov T.I. Development of a mathematical model of an autonomous power supply source with a free-piston motor based on a synchronous electric machine of reciprocating action with permanent magnets. *News of higher educational institutions. Problems of energy*. 2020;22(1):38-48.
12. Tabachnikova TV, Gracheva EI, Naumov OV, et al. Forecasting technical state and efficiency of electrical switching devices at electric complexes in oil and gas industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Almet'yevsk, Republic of Tatarstan, 2020:012014.
13. Gracheva E., Toshkhodzhaeva M., Rahimov O., Dadabaev S., et. al. Modeling the Reliability of High-Voltage Power Transmission Lines Taking into Account the Influence of the Parameters of a Sharply Continental Climate. *International Journal of Technology*, 2020;11(8):1557-1569.
14. Khan MJ, Pushparaj. A novel hybrid maximum power point tracking controller based on artificial intelligence for solar photovoltaic system under variable environmental conditions. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2021; 16(4), 1879-1889.
15. Yılmaz M, Kaleli A, Çorapsız MF. Machine learning based dynamic super twisting sliding mode controller for increase speed and accuracy of MPPT using real-time data under PSCs. *Renewable Energy*. 2023; 219, 119470
16. Aygül K, Cikan M, Demirdelen T, Tumay M. Butterfly optimization algorithm based maximum power point tracking of photovoltaic systems under partial shading condition. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2023; 45(3), 8337-8355.
17. Bouarroudj N, Benlahbib B, Houam Y, Sedraoui M, Batlle VF, Abdelkrim T, et al. Fuzzy based incremental conductance algorithm stabilized by an optimal integrator for a photovoltaic system under varying operating conditions. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2021; 1-26.
18. Tokarev I.S. Development of parameters for an industry-specific methodology for calculating the electric energy storage system for gas industry facilities // *Journal of Mining Institute*. 2024. p. EDN UIZSOQ.

Authors of the publication

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

Ali Nisrin Karim – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Anastasia R. Petrova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Ramil R. Gibadullin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы

Получено **21.08.2024 г.**

Отредактировано **22.10.2024 г.**

Принято **25.10.2024 г.**



СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ УДАЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ

Кириллов И.Е.², Кузнецов Н.М.¹, Лазарев Н.И.¹, Морозов И.Н.^{1,2}

¹Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

²ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет», г. Мурманск, Россия
n.lazarev@ksc.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Арктическая зона становится объектом все более активного интереса в связи с изменением климата и растущей потребностью в устойчивом развитии. Внедрение возобновляемых источников энергии становится ключевым моментом для обеспечения устойчивости и безопасности региона. Исследование направлено на решение проблем развития Арктической зоны России с акцентом на преодолении транспортных и энергетических ограничений и внедрении возобновляемых источников энергии. ЦЕЛЬ. Исследование направлено на разработку и внедрение устойчивых и эффективных энергетических систем в Арктической зоне России с использованием возобновляемых источников энергии, с акцентом на солнечную энергию. Разработать имитационную модель солнечной батареи с системой позиционирования и продемонстрировать подход к повышению эффективности солнечных электростанций. МЕТОДЫ. Сбор и анализ данных измерений значений солнечной радиации и продолжительности солнечного сияния в различных районах Мурманской области. Для оценки эффективности применения солнечных батарей разработана имитационная модель в программном комплексе Matlab приложении Simulink. РЕЗУЛЬТАТЫ. Результаты исследования позволили выявить потенциал использования солнечной энергии в различных районах Мурманской области. Проведенные вычисления позволили определить оптимальную мощность солнечных батарей для горного массива Хибин. Представлена имитационная модель солнечной батареи с реализацией системы позиционирования батареи с целью повышения эффективности работы. Результаты моделирования наглядно демонстрируют повышение эффективности использования солнечных панелей с системой ориентирования. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Значительный потенциал использования солнечной энергии в Арктической зоне достигается с помощью системы позиционирования, что открывает перспективы повышения энергетической эффективности. Учет климатических факторов имеет критическое значение при проектировании и эксплуатации энергетических систем.

Ключевые слова: арктическая зона; солнечные электростанции; солнечная радиация; солнечная батарея; система регулирования.

Для цитирования: Кириллов И.Е., Кузнецов Н.М., Лазарев Н.И., Морозов И.Н. Солнечная энергетика для энергоснабжения удаленных потребителей в Арктической зоне // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 1. С. 48-58. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-48-58.

SOLAR ENERGY FOR POWER SUPPLY OF REMOTE CONSUMERS IN THE ARCTIC ZONE

Kirillov I.E.², Kuznetsov N.M.¹, Lazarev N.I.¹, Morozov I.N.^{1,2}

¹Center of Physical and Technical Problems of Energy of the North KSC RAS, Apatity, Russia

²Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia
n.lazarev@ksc.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The Arctic zone is becoming a subject of increasing interest due to climate change and the growing need for sustainable development. The introduction of renewable energy sources is becoming key to the sustainability and security of the region. The research aimed at solving the problems of development of the Arctic zone of Russia with a focus on overcoming transportation and energy constraints and introducing renewable energy sources is highly relevant. *THE PURPOSE.* The study aims to develop and implement sustainable and efficient energy systems in the Arctic zone of Russia using renewable energy sources, with a focus on solar energy. To develop a simulation model of a solar array with a positioning system and demonstrate an approach to improve the efficiency of solar power plants, which is important for current technological research in renewable energy. *METHODS.* Collection and analysis of measured data of solar radiation values and sunshine duration in different areas of Murmansk region. To evaluate the efficiency of solar panels application, a simulation model was developed in the program complex Matlab application Simulink. *RESULTS.* The results of the study allowed to identify the potential of solar energy utilization in different areas of the Murmansk region. The performed calculations allowed to determine the optimal capacity of solar panels for the Khibiny mountain range, which contributes to the effective utilization of solar energy. A simulation model of a solar panel with the implementation of a battery positioning system to improve the efficiency of operation is presented. *CONCLUSION.* The significant potential of solar energy utilization in the Arctic zone is achieved with the help of a positioning system, which holds promise for sustainable development of the region and improved energy efficiency. Adaptation of solar power plants to specific climatic conditions optimizes their performance and ensures sustainability even in the harsh climate of northern regions.

Keywords: Arctic zone; solar power plants; solar radiation; solar panel; control system.

For citation: Kirillov I.E., Kuznetsov N.M., Lazarev N.I., Morozov I.N. Solar energy for power supply of remote consumers in the Arctic zone. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (1): 48-58. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-48-58.

Введение (Introduction)

Энергетическая проблематика арктических регионов в соответствии с курсом на формирование зеленой экономики [1] и снижение потребления невозобновляемых ресурсов объемных показателей переключается на качественные и структурные показатели [2]. В регионах арктической зоны Российской Федерации эффективным направлением решения локальных энергетических проблем является внедрение распределенной генерации и возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [3].

Цель исследования заключается в повышении энергетической самообеспеченности, устойчивости энергетических систем в Арктической зоне через интеграцию солнечных электростанций. Это поможет снизить зависимость от традиционных источников энергии, улучшить качество жизни жителей региона и содействовать устойчивому развитию Арктики. Важнейшими задачами современного развития Арктической зоны Российской Федерации являются преодоление транспортных и энергетических ограничений, препятствующих повышению темпов экономического развития Арктики, стимулирование приоритетной разработки и внедрения энергосберегающих и энергоэффективных технологий [4, 5]. Исследование возможностей использования возобновляемых источников энергии показало, что высокие показатели по наращиванию объемов генерируемой энергии из ВИЭ с одновременным снижением их себестоимости стали результатом привлечения значительных инвестиций [6].

Для подбора оптимального состава оборудования комплексных энергосистем энергоснабжения автономных потребителей на базе ВИЭ [7] с учетом технических и экономических параметров и реальных природно-климатических условий используется современное программное обеспечение [8]. Создание распределенной системы отопления с использованием солнечной энергии и анализом динамических характеристик солнечных электростанций позволяет оптимизировать теплоснабжение потребителей [9, 10].

Система управления накопителями энергии с использованием нечеткой логики в гибридных генераторных системах электроснабжения отдаленных потребителей позволяет эффективно управлять изменением мощности нагрузки и колебаниями напряжения в электрической сети [11].

Для электроснабжения автономных потребителей, удаленных от энергосистемы, перспективным направлением является применение мобильных ветро-солнечных

электростанций. При этом необходимо учитывать факторы, влияющие на выбор возобновляемых источников электроэнергии и требования автономных потребителей к качеству электроэнергии [12].

Использование технологий, основанных на солнечной энергии, в последнее время вызывает повышенный интерес для удовлетворения различных энергетических потребностей: комбинированного производства тепла и электроэнергии, при использовании горячей воды на бытовые нужды, при кондиционировании в зданиях [13, 14].

Повышение точности расчетов выработки электроэнергии солнечными электростанциями на северных территориях для электроснабжения удаленных потребителей от энергетической системы определяется учетом климатических особенностей регионов [15].

В 2015 г. в поселке Батагай Республики САХА (Якутия) построена одна из крупнейших заполярных солнечных электростанций мощностью 1 МВт. Вырабатываемая электроэнергия позволяет ежегодно экономить до 300 тонн дизельного топлива. Внедряя солнечные электростанции в Верхоянском улусе, холдинг «РАО ЭС Востока» применил «кустовой метод» строительства. Закупка и доставка оборудования для поселков Бетенкес, Столбы и Юнкюр были объединены с реализацией проекта Батагайской солнечной станции, что позволило оптимизировать капитальные затраты [16].

Модернизация электроснабжения удаленных поселений Терского района Мурманской области в 2014-2016 гг. за счет применения ветро-солнечно-дизельных электрических станций позволила обеспечить потребителей круглосуточным электроснабжением. Сократить региональное бюджетное финансирование за счет снижения объемов завозимого топлива на 50 %, снизить себестоимость вырабатываемой электроэнергии и продлить срок эксплуатации дизельных генераторов на 25 % [17].

В 2021 году в поселке Тура Красноярского края введена в эксплуатацию солнечная электростанция мощностью 2,5 МВт с системой накопления энергии. Использование солнечной энергии позволит сократить потребление дизельного топлива до 644 тонн. Для целей проектирования и прогноза эффективности работы солнечных установок необходимы данные о солнечной радиации с максимальным охватом территории. В арктической зоне в летние дни регистрируются потоки солнечного излучения на площадку, ориентированную на солнце, на уровне 1,1-1,2 кВт/м², что близко к предельному заатмосферному значению около 1,4 кВт/м² [18].

Научная значимость исследования состоит в оценке эффективности применения солнечных батарей в Арктической зоне. На примере Мурманской области был проведен анализ данных о солнечной радиации в различных районах региона, что помогало разработать имитационную модель приближенную к реальным условиям. Разработанная модель является инструментом для оптимизации использования солнечной энергии в Арктической зоне, что позволяет повысить точность прогнозирования и разработать оптимальные решения для использования солнечной энергии. Практическая значимость исследования заключается в том, что полученные результаты, могут помочь оптимизировать мощность и расположение солнечных батарей в условиях Арктики, где солнечное сияние менее интенсивно и изменчиво.

Материалы и методы (Materials and methods)

На Кольском полуострове среднегодовое дневное поступление энергии составляет от 2,5 до 3,0 кВт·ч/(м²день). Суммарная (прямая и рассеянная) среднемесячная солнечная радиация на горизонтальную поверхность при действительных условиях облачности [19] на станциях наблюдения в Мурманской области представлена на рисунке 1.

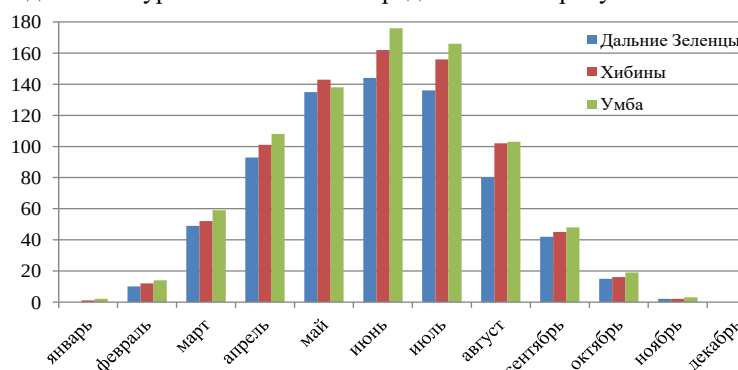


Рис. 1. Солнечная радиация на станциях наблюдения Мурманской области, кВт·ч/м² Fig. 1. Solar radiation at the observation stations of the Murmansk Oblast, kWh/m²

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

Годовая солнечная радиация ($\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$) и продолжительность солнечного сияния (час.) на территории Мурманской области представлена на рисунке 2. Годовая солнечная радиация является важным параметром при оценке потенциала использования солнечной энергии для энергоснабжения. Суммарная годовая солнечная радиация составляет: в районе станции наблюдения Дальних Зеленцов $700 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, в районе станции наблюдения Хибины – $800 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, в районе станции наблюдения Умбы – $840 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$. Эти данные предоставляют информацию о количестве солнечной энергии, которую можно получить и подчеркивают географическое разнообразие и потенциал для использования солнечных электростанций.

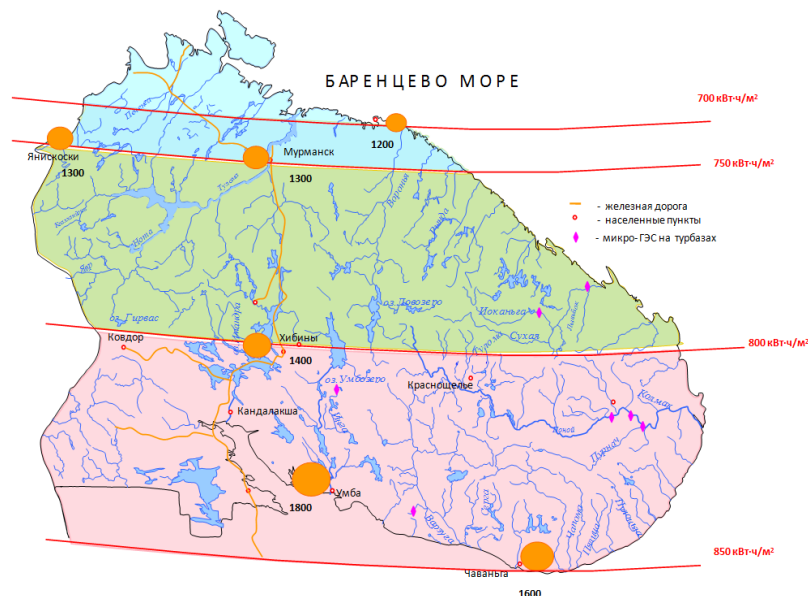


Рис. 2. Годовая солнечная радиация и продолжительность солнечного сияния на территории Мурманской области

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

Суммарная среднемесячная продолжительность солнечного сияния (час.) на станциях наблюдения Мурманской области [20] представлена в таблице 1. Этот параметр показывает количество времени, в течение которого территория находится под воздействием солнечного излучения в среднем за год. Понимание продолжительности солнечного сияния является существенным при проектировании и оценке солнечных электростанций из-за прямого влияния на выработку солнечной энергии и эффективность солнечных систем.

Таблица 1

Table 1

Суммарная среднемесячная продолжительность солнечного сияния (час.) на станциях наблюдения Мурманской области

Total mean monthly duration of solar radiation (h) at the observation stations of the Murmansk Oblast

Станция наблюдения	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Чаванга	10	42	136	200	221	290	302	196	96	63	17	2
Умба	15	70	175	225	255	308	281	225	150	67	24	1
Кандалакша	2	51	139	190	229	275	251	192	121	52	10	0
Краснощелье	4	50	139	170	196	230	247	156	100	46	10	0
Ковдор	2	41	122	175	231	231	266	166	101	48	8	0
Хибины	3	37	128	166	200	258	243	176	97	54	10	0
Мурманск	2	48	149	176	196	247	229	166	123	50	8	0
Янискоски	1	41	119	166	227	215	240	151	95	50	6	0
Дальние Зеленцы	1	37	114	176	177	225	204	141	84	48	6	0
Териберка	6	44	108	164	199	210	255	142	97	53	9	0

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

Результаты (Results)

Произведем расчет мощности солнечных батарей для района Хибины Мурманской области, для того чтобы определить оптимальные мощности солнечных батарей, которые необходимы для производства достаточного количества электроэнергии. Расчет производился по формуле:

$$W_{s,b} = W_m \cdot P_{s,b} \cdot \eta / P_{max}, \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2$$

где $W_{s,b}$ – выработка электроэнергии солнечной батареи за месяц, кВт·ч/м²; W_m – солнечная инсоляция в месяц, кВт·ч/м²; $P_{s,b}$ – номинальная мощность солнечной батареи, кВт; P_{max} – максимальная мощность инсоляции квадратного метра земной поверхности в районе измерения, (кВт/м²); η – коэффициент полезного действия.

Суммарная (прямая и рассеянная) среднемесячная солнечная радиация в районе станции наблюдения Хибины в июне составляет $W_m=162$ кВт·ч/м² (рис. 1), номинальная мощность солнечной батареи 1 кВт, к.п.д. солнечной батареи 15%. В таблице 2 приведены расчеты мощности солнечных батарей.

Таблица 2

Table 2

Расчет выработки солнечных батарей для района Хибины Мурманской области
Calculation of solar panel generation for the Khibiny region of Murmansk Oblast

Номинальная мощность, Вт	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь
400	3,5	6,7	9,5	10,8	10,4	6,8	3
500	4,3	8,4	11,9	13,5	13	8,5	3,8
600	5,2	10,1	14,3	16,2	15,6	10,2	4,5
800	6,9	13,5	19,1	21,6	20,8	13,6	6
1000	8,7	16,8	23,8	27	26	17	7,5
1200	10,4	20,2	28,6	32,4	31,2	20,4	9
1400	12,1	23,6	33,4	37,8	36,4	23,8	10,5
1600	13,9	26,9	38,1	43,2	41,6	27,2	12
1800	15,6	30,3	42,9	48,6	46,8	30,6	13,5
2000	17,3	33,7	47,7	54	52	34	15
2500	21,7	42,1	59,6	67,5	65	42,5	18,8
3200	27,7	53,9	76,3	86,4	83,2	54,4	24

 умеренный режим 10-30 кВт·ч/месяц	 базовый режим 30- 50 кВт·ч/месяц	 комфортный режим 50-70 кВт·ч/месяц
--	---	---

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

Для поддержания базового и комфортного уровня электропотребления (30-70 кВт·ч/мес) с апреля по август необходимы мощности солнечных батарей 1,8 кВт и более. Учет климатических факторов имеет критическое значение при проектировании и эксплуатации энергетических систем. Адаптация солнечных электростанций к конкретным климатическим условиям оптимизирует их производительность и обеспечивает устойчивость даже в условиях сурового климата северных регионов. Для выбора правильного оборудования также необходимо учитывать максимальное значение солнечной радиации в течении дня в течение каждого месяца.

Данные о максимальной солнечной радиации в период с 12 до 15 часов по месяцам (Вт·ч/м²) представлены на рисунке 3. Эти данные помогают понять динамику солнечной активности в разные месяцы при рассмотрении вопросов проектирования и оптимизации солнечных энергетических систем.

Для оценки эффективности применения солнечных батарей разработана имитационная модель в программном комплексе Matlab приложении Simulink. Благодаря наличию библиотек компонентов для электротехнического моделирования и возможности использования их совместно с различными блоками, реализующими математические операции в данном приложении удобно реализовывать модели разнородных технических систем совместно с вычислительными блоками, имитирующими изменяющиеся возмущающие воздействия внешней среды.

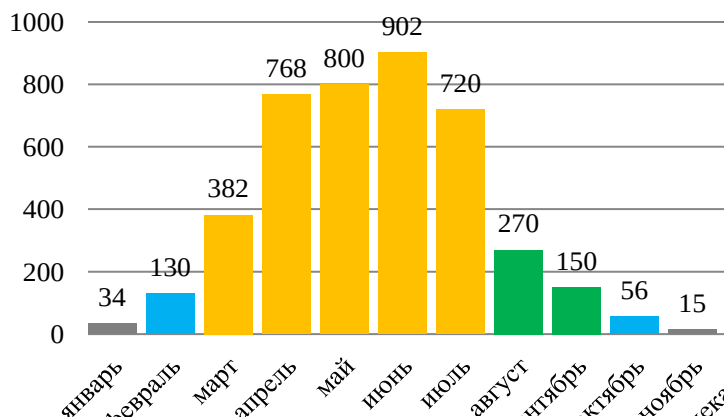


Рис. 3. Максимальная солнечная радиации в период с 12 до 15 часов по месяцам (Вт·ч/м²)

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

Имитационная модель воссоздает работу солнечных батарей близких к реальным условиям, позволяя проанализировать результаты и оптимизировать работу солнечных батарей. На рисунке 4 изображена модель солнечной батареи, реализованная аналогично модели представленной в [21]. Отличительной особенностью представленной модели является возможность моделирования переменной солнечной активности (блок Signal Builder3), а так же моделирование изменения выходного значения мгновенной мощности батареи в зависимости от её позиционирования (вход in1 и блок SignalBuilder2). Для моделирования переменной солнечной активности взяты суточные данные солнечной радиации за июнь месяц для района Хибины Мурманской области. Номинальная мощность солнечной батареи в имитационной модели 1 кВт.

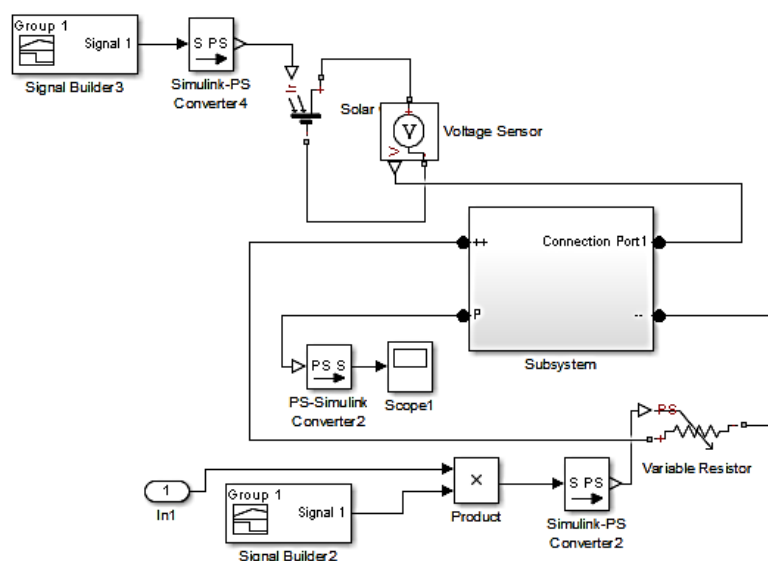


Рис. 4. Модель солнечной батареи

Fig. 4. Model of a solar cell

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

Для оценки возможности повышения эффективности солнечной батареи к модели добавлена система управления поворотом солнечной панели, учитывающая изменение светового потока и перемещение солнца в течение дня. Схема ориентирует солнечную батарею в одной плоскости в соответствии перемещения солнца в течение суток. Регулирование угла наклона по двум осям также позволит увеличить объем вырабатываемой энергии солнечными электростанциями [22]. Данная система управления реализована в виде схемы гелиостата, представленной на рисунке 5.

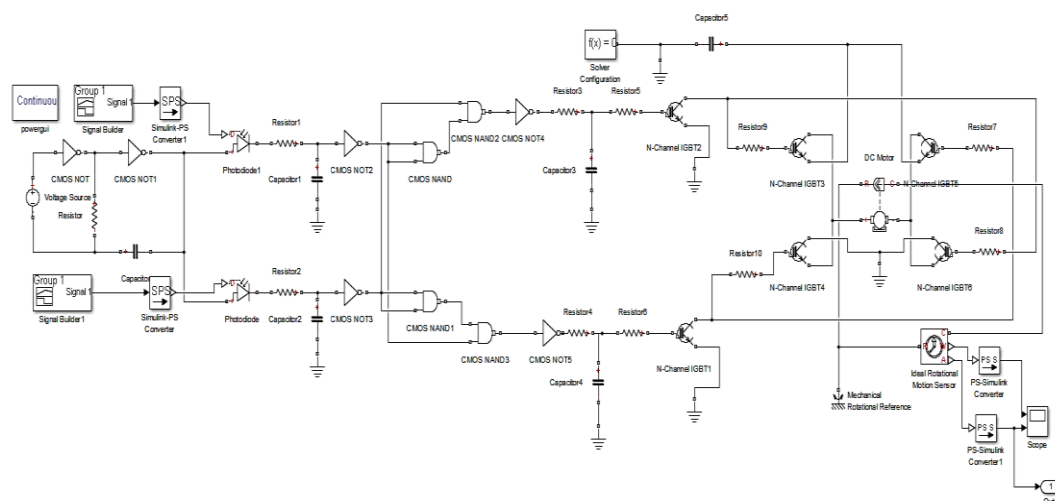


Рис. 5. Схема регулирования угла наклона солнечной панели Fig. 5. Scheme of solar panel tilt angle regulation

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

В данной модели в качестве датчиков, значения сигналов которых помогают в позиционировании батареи, выступают два фотодиода (Photodiode1 и Photodiode) пропускная способность которых зависит от интенсивности попадания на них солнечного света. При перемещении солнца в течение дня, или в случае изменения интенсивности освещения датчиков в зависимости от облачности на каждый из датчиков приходится различное количество излучения. Токи, пропускаемые датчиками, являются управляющими сигналами для мостовой схемы, реализованной на IGBT транзисторах. Данные транзисторы открываются или закрываются по диагонали, в зависимости от того, с какого датчика поступает управляющий сигнал. Открытие определенной пары ключей моста приводит к срабатыванию блока DC Motor, реализующего электропривод позиционирования солнечной батареи, благодаря наличию двух датчиков движение привода может осуществляться реверсивно и сама батарея будет ориентирована в сторону соответствующую максимальному уровню освещения.

Для демонстрации эффекта от внедрения системы позиционирования солнечной батареи на рисунке 6 приведены сравнительные результаты моделирования работы солнечных батарей. В модели были реализованы два варианта системы управления поворотом солнечной батареи:

1. система регулирования поворота в одной плоскости, она позволяет направлять солнечную батарею в направление наибольшего солнечного излучения в горизонтальной плоскости.

2. система регулирования поворота по двум осям, она позволяет направлять солнечную батарею в направление наибольшего солнечного излучения в двух плоскостях (горизонтальной и вертикальной).

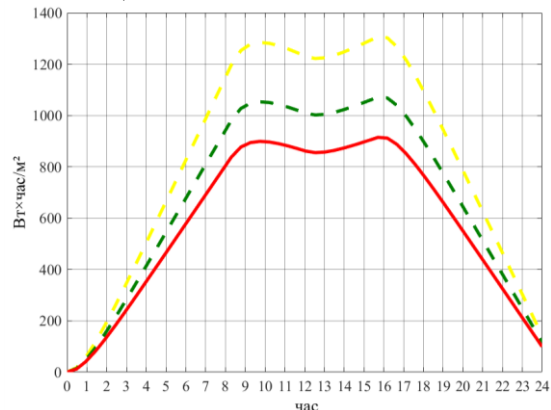


Рис. 6. Сравнительные результаты моделирования Fig. 6. Comparative results of modeling
 - - - - с системой регулирования в двух плоскостях, - - - - с системой регулирования в одной плоскости, — без системы регулирования поворота
 with two-plane control system, with one-plane control system, without rotation control

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

График, выполненный сплошной линией, представляет результат работы батареи без системы регулирования поворота. В дневные часы наиболее активного солнечного излучения эффективность от применения системой регулирования поворота в одной плоскости составляет около 12-15%, с системой регулирования по двум осям эффективность использования солнечной батареи возрастает до 30-35%. В утренние и вечерние часы эффект от применения системы управления поворотом солнечной панели менее значительный.

Заключение (Conclusions)

Интеграция солнечных электростанций представляет собой эффективное решение для обеспечения энергетической самодостаточности в северных регионах. Этот подход позволяет более надежно удовлетворять потребности удаленных потребителей, где традиционные источники энергии ограничены.

Годовая солнечная радиация и продолжительность солнечного сияния являются ключевыми параметрами, которые прямо влияют на производство и эффективность солнечных электростанций. Сравнив данные по солнечной радиации для разных районов области, можно отметить значительное географическое разнообразие и потенциал для использования солнечных электростанций.

Расчет мощности солнечных батарей подчеркивает важность учета климатических факторов при проектировании солнечных энергетических систем и необходимость адаптации к конкретным условиям для оптимизации производительности. Таким образом, солнечная радиация и климатические особенности региона является основой для эффективного проектирования и эксплуатации солнечных энергетических систем.

Создание экономичных в эксплуатации двухкоординатных систем управления солнечными панелями является ключевым фактором в обеспечении эффективности и позволяет снизить операционные издержки и повысить общую экономическую эффективность. Дальнейшие исследования в этой области могут включать в себя более детальное изучение климатических условий других регионов Арктической зоны, разработку новых методов управления мощностью солнечных батарей и оценку их экономической эффективности.

Литература

1. Пакина, А. А. Перспективы зелёной экономики как новой парадигмы развития / А. А. Пакина, В. А. Горбанев // Вестник МГИМО Университета. – 2019. – Т. 12, № 5. – С. 134-155. – DOI [10.24833/2071-8160-2019-5-68-134-155](https://doi.org/10.24833/2071-8160-2019-5-68-134-155). – EDN [TFIKCT](#).
2. Лаженцев, В. Н. Арктика и Север в контексте пространственного развития России / В. Н. Лаженцев // Экономика региона. – 2021. – Т. 17, № 3. – С. 737-754. – DOI [10.17059/ekon.reg.2021-3-2](https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2021-3-2). – EDN [PWNOPP](#).
3. Кузнецов, Н. М. Развитие распределенной энергетики в Мурманской области / Н. М. Кузнецов, О. Е. Коновалова // Фундаментальные исследования. – 2021. – № 5. – С. 122-127. – DOI [10.17513/fr.43049](https://doi.org/10.17513/fr.43049). – EDN [YCTFGP](#).
4. E Nalivaychenko et al 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 918 012238. DOI <https://doi.org/10.1088/1757-899X/918/1/012238>.
5. Gorodnov A.G. Construction of energy-efficient electrical complexes with an autonomous power supply system // News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS. 2020. Vol. 22. No. 4. pp. 64-78. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-64-78.
6. Тишков С.В., Наливайченко Е.В., Волков А.Д., Щербак А.П., Каргинова-Губинова В.В., Пахомова А.А. Повышение энергоэффективности экономики Арктической зоны Российской Федерации: проблемы, перспективы, методы оценки. М.:Первое экономическое издательство, 2021. – 130 с. – ISBN 978-5-91292-358-6. – DOI [10.18334/9785912923586](https://doi.org/10.18334/9785912923586). - EDN [IKKNOR](#).
7. M. Arun Noyal Doss, R. Naveenkumarb, R. Ravichandranc, J. Rengarajd, M. Manikandane. PV Fed Asymmetrical Switched Diode Multi Level Inverter With Minimum Number of Power Electronic Components. Energy Procedia, 2017, vol. 117, pp592-599. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.155>.
8. Денисов, К. С. Решение задачи комплексного энергоснабжения автономного потребителя с целью уменьшения экономических затрат / К. С. Денисов, В. И. Велькин, А. Н. Тырсин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 84-92. DOI [10.14529/power190309](https://doi.org/10.14529/power190309). – EDN [EKYWXK](#).
9. Y. Liu, J. Liu, Y. Chen, D. Wang, Y. Li, Z. Liu, H. Tang, C. Song. Study of the thermal performance of a distributed solar heating system for residential buildings using a heat-user node model. Energy and Buildings, 2022, Vol. 254, p. 111569. DOI <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111569>.

10. Москаленко Н.И. Численное моделирование воздействий метеосостояния атмосферы на эффективность функционирования солнечных тепловых и электрических станций / Ахметшин А.Р., Сафиуллина Я.С., Додов И.Р., Хамидуллина М.С. // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 5. С. 86-99. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-86-99
11. Said S.M., Salama H.S., Hartmann B., Vokony I.A robust SMES controller strategy for mitigating power and voltage fluctuations of grid connected hybrid PV–wind generation systems. Electrical Engineering. 2019. Vol. 101. Iss. 3. P. 1019–1032. DOI <https://doi.org/10.1007/s00202-019-00848-z>.
12. Мобильные ветро-солнечные электростанции: состояние, перспективы и особенности проектирования / О.В. Григоращ, Е.А. Денисенко, Д.Н. Грищенко, П.М. Барышев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2023. Т. 23, № 1. С. 48–55. – DOI [10.14529/power230105](https://doi.org/10.14529/power230105). – EDN: [CRODXG](https://www.edn.ru/CRODXG).
13. Modi A., Bühler F., Andreasen J. G., Haglind F. A review of solar energy based heat and power generation systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 67. P. 1041-1064. DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.075>
14. F. Reda, M. Viot, K. Sipila, M. Helm. Energy assessment of solar cooling thermally driven system configurations for an office building in a Nordic country, Appl. Energy. 166 (2016) 27-43. – DOI [10.1016/j.apenergy.2015.12.119](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.119).
15. Оценка функционирования солнечных электростанций в климатических условиях Севера / Н. П. Местников, П. Ф. Васильев, Н. С. Бурянина [и др.] // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2022. Т. 7, № 2(28). С. 101-110. – DOI [10.25744/genb.2022.37.74.011](https://doi.org/10.25744/genb.2022.37.74.011). – EDN: [OUPGYM](https://www.edn.ru/OUPGYM).
16. Кузнецов, Н.М. Управление энергоэффективностью в регионах Арктической зоны Российской Федерации: монография / Н. М. Кузнецов // Апатиты: Издательство ФИЦ КНЦ РАН. – 2020. – 92 с.: ил. ISBN 9785911374341. – DOI [10.37614/978.5.91137.434.1](https://doi.org/10.37614/978.5.91137.434.1). EDN [GVUSWV](https://www.edn.ru/GVUSWV).
17. Коновалова, О. Е. Возобновляемые источники энергии в Мурманской области / О. Е. Коновалова, Н. М. Кузнецов // Промышленная энергетика. – 2018. – № 9. – С. 51-56. – EDN [YOGUDJ](https://www.edn.ru/YOGUDJ).
18. Использование возобновляемых источников энергии для энергоснабжения потребителей в Арктической зоне Российской Федерации / О. С. Попель, С. В. Киселева, М. О. Моргунова [и др.] // Арктика: экология и экономика. – 2015. – № 1(17). – С. 64-69. – EDN [TUUTMJ](https://www.edn.ru/TUUTMJ).
19. Минин, В. А. Перспективы использования солнечной энергии в Мурманской области / В. А. Минин, Т. И. Якунина, И. Л. Коробко // Проблемы энергообеспечения Мурманской области. – Апатиты: Кольский научный центр РАН, 1992. – С. 73-81.
20. Апасова, Е. Г. Описание массива данных суммарной за месяц продолжительности солнечного сияния на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015621446 / Е. Г. Апасова, Л. К. Клещенко [Электронный ресурс] <http://meteo.ru/data/160-sunshine-duration#описание-массива-данных> (дата обращения 30.01.2024)
21. Колосов, Р. В. Моделирование солнечных батарей / Р. В. Колосов // Интеллектуальная электротехника. 2019. № 2. С. 85-93. – DOI [10.46960/2658-6754_2019_2_85](https://doi.org/10.46960/2658-6754_2019_2_85). – EDN [JVVVED](https://www.edn.ru/JVVVED).
22. Митрофанов С.В. Выбор оптимального угла наклона солнечных панелей для размещения их в произвольном регионе // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2023. Т. 23, № 1. С. 5–11. – DOI [10.14529/power230101](https://doi.org/10.14529/power230101). – EDN [ZDAYFE](https://www.edn.ru/ZDAYFE).

Авторы публикации

Кириллов Иван Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры физики, биологии и инженерных технологий Мурманского арктического университета (МАУ), г. Мурманск, Россия. kirillovi@rambler.ru

Кузнецов Николай Матвеевич – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник центра физико-технических проблем энергетики Севера Федерального исследовательского центра КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия. n.kuznetsov@ksc.ru

Лазарев Никита Игоревич – инженер центра физико-технических проблем энергетики Севера Федерального исследовательского центра КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия. n.lazarev@ksc.ru

Морозов Иван Николаевич – канд. техн. наук, заведующий кафедрой физики, биологии и инженерных технологий Мурманского арктического университета (МАУ), г. Мурманск, Россия. moroz.84@mail.ru

References

1. Pakina, A. A. Prospects of green economy as a new paradigm of development / A. A. Pakina, V. A. Gorbanev // Bulletin of MGIMO University. - 2019. - T. 12, № 5. - C. 134-155. - DOI [10.24833/2071-8160-2019-5-68-134-155](https://doi.org/10.24833/2071-8160-2019-5-68-134-155). - EDN [TFIKCT](https://www.edn.ru/TFIKCT).
2. Lazhentsev, V. N. Arctic and the North in the context of Russia's spatial development / V. N. Lazhentsev // Regional Economics. - 2021. - T. 17, № 3. - C. 737-754. - DOI [10.17059/ekon.reg.2021-3-2](https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2021-3-2). - EDN [PWHOPP](https://www.edn.ru/PWHOPP).
3. Kuznetsov, N. M. Development of distributed energy in the Murmansk region / N. M. Kuznetsov, O. E. Konovalova // Fundamental Research. - 2021. - № 5. - C. 122-127. - DOI [10.17513/fr.43049](https://doi.org/10.17513/fr.43049). - EDN [YCTFPG](https://www.edn.ru/YCTFPG).
4. E. Nalivaychenko et al 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 918 012238. DOI <https://doi.org/10.1088/1757-899X/918/1/012238>.
5. Gorodnov A.G. Construction of energy-efficient electrical complexes with an autonomous power supply system // News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS. 2020. Vol. 22. No. 4. pp. 64-78. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-64-78.
6. Tishkov S.V., Nalivaichenko E.V., Volkov A.D., Scherbak A.P., Karginova-Gubinova V.V., Pakhomova A.A. Increasing energy efficiency of the economy of the Arctic zone of the Russian Federation: problems, prospects, methods of assessment. Moscow: First Economic Publishing House, 2021. - 130 c. - ISBN 978-5-91292-358-6. - DOI [10.18334/9785912923586](https://doi.org/10.18334/9785912923586). - EDN [IKKNOR](https://www.edn.ru/IKKNOR).
7. M. Arun Noyal Doss, R. Naveenkumarb, R. Ravichandran, J. Rengarajd, M. Manikandane. PV Fed Asymmetrical Switched Diode Multi Level Inverter With Minimum Number of Power Electronic Components. Energy Procedia, 2017, vol. 117, pp592-599. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.155>.
8. Denisov, K. S. Solution of the problem of complex power supply of an autonomous consumer in order to reduce economic costs / K. S. Denisov, V. I. Velkin, A. N. Tyrsin // Bulletin of SUSU. Series "Energetics". - 2019. - T. 19, № 3. - C. 84-92. DOI [10.14529/power190309](https://doi.org/10.14529/power190309). - EDN [EKYWXX](https://www.edn.ru/EKYWXX).
9. Y. Liu, J. Liu, Y. Chen, D. Wang, Y. Li, Z. Liu, H. Tang, C. Song. Study of the thermal performance of a distributed solar heating system for residential buildings using a heat-user node model. Energy and Buildings, 2022, Vol. 254, p. 111569. DOI <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111569>.
10. Moskalenko N.I. Numerical modeling of the effects of atmospheric meteorological conditions on the efficiency of operation of solar thermal and electric power plants / Akhmetshin A.R., Safiullina Ya.S., Dodov I.R., Khamidullina M.S. // Izvestia of Higher educational institutions. PROBLEMS OF ENERGY. 2021. Vol. 23. No. 5. PP. 86-99. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-86-99
11. Said S.M., Salama H.S., Hartmann B., Vokony I.A robust SMES controller strategy for mitigating power and voltage fluctuations of grid connected hybrid PV-wind generation systems. Electrical Engineering. 2019. Vol. 101. Iss. 3. P. 1019-1032. DOI <https://doi.org/10.1007/s00202-019-00848-z>.
12. Mobile wind-solar power plants: state, prospects and design features / O.V. Grigorash, E.A. Denisenko, D.N. Grishchenko, P.M. Baryshev // Bulletin of SUSU. Series "Energetics". 2023. T. 23, № 1. C. 48-55. - DOI [10.14529/power230105](https://doi.org/10.14529/power230105). - EDN: [CRODXG](https://www.edn.ru/CRODXG).
13. Modi A., Bühler F., Andreasen J. G., Haglind F. A review of solar energy based heat and power generation systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 67. P. 1041-1064. DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.075>.
14. F. Reda, M. Viot, K. Sipila, M. Helm. Energy assessment of solar cooling thermally driven system configurations for an office building in a Nordic country, Appl. Energy. 166 (2016) 27-43. - DOI [10.1016/j.apenergy.2015.12.119](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.119).
15. Assessment of solar power plants functioning in the climatic conditions of the North / N. P. Mestnikov, P. F. Vasiliev, N. S. Buryanina [et al.] // Grozny Natural Science Bulletin. 2022. T. 7, № 2(28). C. 101-110. - DOI [10.25744/genb.2022.37.74.011](https://doi.org/10.25744/genb.2022.37.74.011). - EDN: [OUPGYM](https://www.edn.ru/OUPGYM).
16. Kuznetsov, N.M. Energy efficiency management in the regions of the Arctic zone of the Russian Federation: a monograph / N.M. Kuznetsov // Apatity: Publishing house of FIC KSC RAS. - 2020. - 92 p.: ill. ISBN 9785911374341. - DOI [10.37614/978.5.91137.434.1](https://doi.org/10.37614/978.5.91137.434.1). EDN [GVUSWV](https://www.edn.ru/GVUSWV).
17. Konovalova, O. E. Renewable energy sources in the Murmansk region / O. E. Konovalova, N. M. Kuznetsov // Industrial Energy. - 2018. - № 9. - C. 51-56. - EDN [YOGUDI](https://www.edn.ru/YOGUDI).
18. Use of renewable energy sources for power supply to consumers in the Arctic zone of the Russian Federation / O. S. Popel, S. V. Kiseleva, M. O. Morgunova [et al.] // Arctic: ecology and economy. - 2015. - № 1(17). - C. 64-69. - EDN [TUUTMJ](https://www.edn.ru/TUUTMJ).
19. Minin, V. A. Prospects for the use of solar energy in the Murmansk region / V. A. Minin, T. I. Yakunina, I. L. Korobko // Problems of energy supply of the Murmansk region. - Apatity: Kola Scientific Center of RAS, 1992. - C. 73-81.
20. Apasova, E. G. Description of the data array of the total monthly duration of solar shining at the stations of Russia. Certificate of state registration of the database No. 2015621446 / E. G. Apasova, L. K.

Kleshchenko [Electronic resource] <http://meteo.ru/data/160-sunshine-duration#описание-массива-данных> (accessed on 30.01.2024).

21. Kolosov, R. V. Modeling of solar batteries / R. V. Kolosov // Intellectual Electrical Engineering. 2019. № 2. С. 85-93. – DOI [10.46960/2658-6754_2019_2_85](https://doi.org/10.46960/2658-6754_2019_2_85). – EDN [JVVED](https://www.edn.ru/jvved).

22. Mitrofanov S.V. Selection of the optimal angle of inclination of solar panels for their placement in an arbitrary region // Bulletin of SUSU. Series "Energy". 2023. Т. 23, № 1. С. 5-11. – DOI [10.14529/power230101](https://doi.org/10.14529/power230101). – EDN [ZDAYFE](https://www.edn.ru/zdayfe).

Authors of the publication

Ivan E. Kirillov – Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia. kirillovi@rambler.ru

Nikolay M. Kuznetsov – Center of Physical and Technical Problems of Energy of the North KSC RAS, Apatity, Russia. n.kuznetsov@ksc.ru

Nikita I. Lazarev – Center of Physical and Technical Problems of Energy of the North KSC RAS, Apatity, Russia. n.lazarev@ksc.ru

Ivan N. Morozov – Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia. moroz.84@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы

Получено 09.10.2024 г.

Отредактировано 23.10.2024 г.

Принято 28.10.2024 г.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА



УДК 621.314.21:621.316.1:621.3.027.2

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-1-59-69

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА ОБРАТНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ В СЕЛЬСКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 10/0,4 кВ

Лансберг А.А.¹, Виноградов А.В.¹, Панфилов А.А.²

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва, Россия

²Орловский государственный аграрный университет, г. Орёл, Россия

lansbergaa@vk.com

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ.** В настоящее время существует опасность подачи несанкционированного напряжения в сельских электрических сетях 0,4 кВ, которое посредством обратной трансформации на трансформаторной подстанции может быть подано на сторону 10 кВ. Это может привести к смертельным несчастным случаям среди персонала электросетевых организаций, или сторонних лиц. **ЦЕЛЬ.** Исследование режима обратной трансформации в сельской электрической сети 10/0,4 кВ посредством физического моделирования. **МЕТОДЫ.** Исследование проводилось на физической модели сельской электрической сети 10/0,4 кВ с применением однофазного трансформатора малой мощности в качестве источника несанкционированного напряжения, который подключался в сеть низкого напряжения на разном удалении от модели трёхфазного трансформатора 10/0,4 кВ. В опытах осуществлялись измерения электрических параметров на сторонах низкого и высокого напряжения модели трансформатора 10/0,4 кВ. Полученные значения, с использованием коэффициентов подобия, пересчитывались для сельской электрической сети 10/0,4 кВ, питающейся от трансформатора 10/0,4 кВ мощностью 250 кВА. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Выявлено, что подключение однофазного источника несанкционированного напряжения в сеть 0,4 кВ в зависимости от удаления его от трансформатора 10/0,4 кВ приводит к значениям напряжения на выводе 0,4 кВ трансформатора от 11 В до 81 В (при приближении к началу отходящей от трансформатора линии) на фазе, к которой подключен источник несанкционированного напряжения. На стороне 10 киловольт при этом напряжение изменяется от 234 В до 2579 В. Напряжения двух других фаз на стороне 10 кВ составляют от 66 до 421 В, а на стороне 0,4 кВ – от 4,4 В до 22 В. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Полученные результаты могут использоваться в качестве уставок срабатывания технических средств сигнализации и блокировки обратной трансформации, предотвращающих обратную трансформацию в электрических сетях 10/0,4 кВ.

Ключевые слова: обратная трансформация; несанкционированное напряжение; трансформатор; линия электропередачи; физическая модель; загрузка трансформатора; фазные напряжения.

Для цитирования: Лансберг А.А., Виноградов А.В., Панфилов А.А. Физическое моделирование режима обратной трансформации в сельской электрической сети 10/0,4 кВ // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 1. С. 59-69. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-59-69.

PHYSICAL MODELING OF THE REVERSE TRANSFORMATION MODE IN A RURAL 0.4/10 kV ELECTRIC GRID

Lansberg A.A.¹, Vinogradov A.V.¹, Panfilov A.A.²

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

²Oryol State Agrarian University, Orel, Russia

lansbergaa@vk.com

Abstract: **RELEVANCE.** Currently, there is a danger of supplying unauthorized voltage in rural electrical networks of 0.4 kV, which through reverse transformation at a transformer substation

can be supplied to the 10 kV side. This can lead to fatal accidents among the staff of power grid organizations, or third parties. **THE PURPOSE.** Investigation of the reverse transformation mode in a rural 10/0.4 kV electric grid by means of physical modeling. **METHODS.** The study was conducted on a physical model of a 10/0.4 kV rural electric network using a single-phase low-power transformer as a source of unauthorized voltage, which was connected to a low-voltage network at different distances from the model of a three-phase 10/0.4 kV transformer. In the experiments, electrical parameters were measured on the low and high voltage sides of the 10/0.4 kV transformer model. The obtained values, using similarity coefficients, were recalculated for a rural 10/0.4 kV electric grid powered by a 10/0.4 kV transformer with a capacity of 250 kVA. **RESULTS.** It was revealed that connecting a single-phase unauthorized voltage source to a 0.4 kV network, depending on its removal from a 10/0.4 kV transformer, leads to voltage values at the 0.4 kV output of the transformer from 11 V to 81 V (when approaching the beginning of the line departing from the transformer) in the phase to which the unauthorized voltage source is connected. On the 10 kilovolt side, the voltage varies from 234 V to 2579 V. The voltages of the other two phases on the 10 kV side range from 66 to 421 V, and on the 0.4 kV side – from 4.4 V to 22 V. **CONCLUSION.** The results obtained can be used as setpoints for triggering technical means of signaling and blocking reverse transformation, preventing reverse transformation in electric networks of 10/0.4 kV.

Keywords: reverse transformation; unauthorized voltage; transformer; power line; physical model; transformer loading; phase voltages.

For citation: Lansberg A.A., Vinogradov A.V., Panfilov A.A. Physical modeling of the reverse transformation mode in a rural 0.4/10 kV electric grid. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (1): 59-69. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-59-69.

Введение (Introduction)

В настоящее время в электросетевом комплексе происходит много несчастных случаев. Например, в электроэнергетических компаниях Греции с 1983 по 1996 гг. ежегодно происходило от 373 до 560 несчастных случаев. При этом 80% пострадавших имели должности оперативного персонала. Наиболее частыми причинами несчастных случаев стали нарушение правил охраны труда (18,84% от общего количества несчастных случаев) и неудовлетворительная организация безопасного выполнения работ (22,49%) [1]. При этом одними из наиболее частых поражающих факторов является попадание под наведённое напряжение на отключенных токоведущих частях электроустановок. Данное напряжение является несанкционированным, то есть неожиданно появившимся на токоведущих частях электроустановок для персонала электросетевых компаний, который встречает факт его наличия. Так, за 1998-2016 гг. в электросетевых компаниях России зафиксировано 34 несчастных случая от наведённого напряжения, 13 из которых произошли на воздушных линиях электропередачи 110 кВ [2]. Для минимизации возникновения несанкционированного напряжения на воздушных линиях электропередачи 110 кВ проводятся как технические и организационные мероприятия [3], реализуемые электросетевыми компаниями, так и разрабатываются новые способы и технические средства научными организациями. Например, разрабатываются новые методы расчёта наведённых напряжений [4], совершенствуются методы определения напряжений на отключенных линиях электропередачи [5], проводятся исследования влияния грозозащитного троса на величину наведённых напряжений на отключенных воздушных линиях электропередачи [6].

В работе [7] отмечено, что из 191 несчастного случая за 2014-2022 произошедших в электросетевых компаниях Российской Федерации такие поражающие факторы, как наведённое напряжение на отключенных электроустановках от высоковольтных установок, расположенных вблизи, привели к гибели 4 сотрудников. При этом наиболее редкий фактор обратной трансформации на трансформаторных подстанциях 10/0,4 кВ, вследствие которого несанкционированное напряжение появляется на токоведущих частях 0,4 кВ и 6-10 кВ, стал причиной 4 смертельных несчастных случаев.

Перечисленные выше факторы могут характеризоваться как несанкционированная подача напряжения на отключенные части электроустановок. Для высоковольтных электроустановок наиболее часто несанкционированное напряжение может появиться вследствие наведённого напряжения. При этом в низковольтных электроустановках факторов появления несанкционированного напряжения больше. Одним из факторов

является подача напряжения от резервного источника электроснабжения, который может быть на балансе у потребителя. Именно данный фактор стал причиной 4 несчастных случаев работников электросетевых компаний [7].

При этом несанкционированное напряжение может появиться не только от резервных источников генерации потребителей, но и от не правильных действий персонала с такими источниками, имеющимися в наличии у электросетевой компании. Например, в электросетевой компании ПАО «Россети Урал» используются 128 резервных дизельных генераторов [8]; а в ПАО «Россети Московский Регион» – 121 резервный дизельный генератор общей мощностью 34757 кВт [9]. В свою очередь, в ПАО «Россети Северо-Запад»-«Комиэнерго» используется дизельная электростанция мощностью 400 кВт для резервирования потребителей через ТП 20/0,4 кВ [10]. А в ПАО «Россети Волга» используется дизельная установка обратной трансформации мощностью 500 кВт для плавки гололеда на ВЛ 0,4 кВ и ВЛ 6-10 кВ [11].

Следует отметить, что дизельные и бензиновые генераторы на протяжении длительного периода времени остаются наиболее проработанным техническим решением не только при использовании их в качестве резервного источника электроснабжения электросетевыми компаниями, но и для резервирования промышленных потребителей агропромышленного комплекса [12] и сельских жилых домов [13], электроснабжения собственных нужд нефтепроводов [14-16], а также резервирования электроприёмников угольных шахт [17].

В работе [18] была проведена экспертная оценка вероятности несанкционированной подачи напряжения в сельских электрических сетях 10/0,4 кВ, которая позволила выявить удельное значение вероятности возникновения несанкционированного напряжения со значением 0,0056 случаев на один километр линии электропередачи 0,4 кВ в год. При этом фактические значения несанкционированного напряжения, которые характерны для сельских электрических сетей 10/0,4 кВ, в справочной литературе отсутствуют. Решить данную задачу, связанную с определением численных значений несанкционированного напряжения, возможно путём физического моделирования, которое является наиболее достоверным инструментом исследования процессов, происходящих в электрических сетях. Для решения данной задачи в лаборатории электроснабжения, электрооборудования и возобновляемой энергетики ФГБНУ ФНАЦ ВИМ была разработана физическая модель сельской электрической сети 10/0,4 кВ [19], на которой проводилось исследование режима несанкционированной подачи напряжения.

Цель исследования заключается в определении электрических параметров, характерных для режима несанкционированной подачи напряжения с последующей обратной трансформацией в сельской электрической сети 10/0,4 кВ на физической модели.

Материалы и методы (Materials and methods)

Для физической модели сельской электрической сети 10/0,4 кВ были обоснованы коэффициенты подобия [19], которые позволяют производить пересчёт электрических параметров модели на промышленные, то есть получить характеристики действующей сельской электрической сети 0,4 кВ.

Пересчёт электрических параметров с помощью коэффициентов подобия производился для сельской электрической сети 0,4 кВ, питание которой осуществляется от трансформатора ТМ-250 Y/Y_n 10/0,4 кВ с использованием провода А-35, потому что протяженность провода А-35 в сельских электрических сетях 0,4 кВ отдельных регионов достигает 27% [20], а трансформаторы мощностью 250 кВА составляют 13% от общего количества в парке трансформаторов 6-10 кВ [20]. Коэффициенты подобия для данных промышленных параметров представлены в таблице 1 [19].

Таблица 1

Table 1

Коэффициенты подобия для трансформатора ТМ-250 Y/Y_n 10/0,4 кВ и провода А-35
Similarity coefficients for transformer ONAN-250 Y/Y_n 10/0,4 kV and wire A-35

Мощность, S, кВА	Коэффициент подобия по напряжению, m_U , о.е.	Коэффициент подобия по сопротивлению, m_Z , о.е.	Коэффициент подобия по току, m_I , о.е.	Коэффициент подобия по мощности, m_S , о.е.
Коэффициенты подобия для стороны низкого напряжения НН				
250	0,1	21,44	0,0047	0,00047
Коэффициенты подобия для стороны низкого напряжения ВН				
250	0,038	3,42	0,011	0,0004

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

Опыты несанкционированной подачи напряжения реализовывались согласно принципиальной электрической схеме (рис. 1).

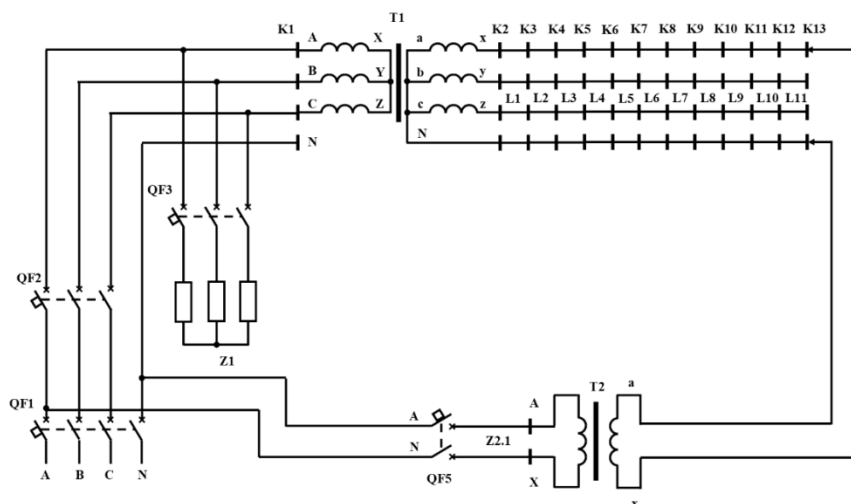


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема реализации опыта несанкционированной подачи напряжения и обратной трансформации

Fig. 1. Schematic diagram of the implementation of the experience of unauthorized voltage supply and reverse transformation

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

Согласно рисунку 1, эксперименты осуществлялись следующим образом. Включался вводной автоматический выключатель лабораторного стенда QF1. При этом автоматический выключатель QF2, осуществляющий подачу напряжения на трёхфазный трансформатор малой мощности T1, предназначенный для питания физической модели, оставался в отключенном положении. В свою очередь, с помощью автоматического выключателя QF3 производилось включение нагрузки со стороны 10 кВ. Моделирование подачи несанкционированного напряжения в электрическую сеть 0,4 кВ реализовывалось путем включения двухполюсного автоматического выключателя QF5, в результате чего напряжение подавалось через однофазный трансформатор T2, использующийся в качестве источника несанкционированного напряжения (ИНН), на сторону 0,4 кВ электрической сети. Измерение электрических параметров производилось с использованием цифровых многофункциональных мультиметров типа Omix P99-MZ-3-0,5-RS485 и портативного мультиметра с щупами. Согласно рисунку 1, ИНН подключался к точке K13. В работе также рассматривались варианты приближения ИНН к модели трансформатора T1 и его подключение к точкам K10, K7, K4.

Во всех опытах в качестве источника несанкционированного напряжения (T2) использовался однофазный трансформатор типа ТБС 2 0,1-220/22В мощностью 100 ВА с номинальным током 4,2 А. В реальности источником несанкционированного напряжения может быть резервный дизельный генератор, который может быть в наличии у потребителей электрических сетей 0,4 кВ и у персонала электросетевых организаций. Мощность модели источника несанкционированного напряжения составляла 62,5% от мощности используемого трёхфазного трансформатора модели типа ТТ 0,16-380/38 В с номинальным током 2,43 А.

В качестве нагрузки Z1 были использованы 2 вида одинаковых электроприёмников, а также в одном из опытов был выключен выключатель QF3, что имитировало работу модели трансформатора на холостом ходу. Так, были использованы лампы накаливания на 220 В мощностью 40 Вт (нагрузка №1), а также светодиодные лампы мощностью 15 Вт на напряжение 220 В (нагрузка №2). На физической модели было реализовано 12 опытов. Для каждого из 3 видов нагрузок исследовалось влияние обратной трансформации при подключении ИНН в 4 точках на модели сети 0,4 кВ.

Результаты (Results)

Одним из реализованных опытов было исследование явления обратной трансформации при использовании ламп накаливания и подключении источника несанкционированного напряжения к точке K4 (рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид реализации опыта обратной трансформации на разработанной физической модели

Fig. 2. The appearance of the implementation of the experience of reverse transformation on the developed physical model

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

В ходе опыта при нагрузке №1 было измерено, что напряжения на модели электрической сети 0,4 кВ по фазам В и С находятся в диапазоне 2,2-4,5 В, а по фазе А, к которой подключен ИНН – 19,8-24,6 В, при номинальном напряжении физической модели 22 В. В свою очередь, на стороне 10 кВ модели трансформатора напряжение между фазой А и искусственной нейтралью (N) составило 98 В, между В и N – 15 В, между С и N – 16 В, при этом номинальное напряжение стороны высшего напряжения модели составляет 220 В.

При реализации опытов обратной трансформации были проведены измерения электрических параметров на физической модели (табл. 2).

Таблица 2

Table 2

Электрические параметры модели при реализации опыта обратной трансформации
Electrical parameters of the model during the implementation of the reverse transformation experience

Приборы	Активные мощности			Полные мощности		
	P(A), Вт	P(B), Вт	P(C), Вт	S(A), ВА	S(B), ВА	S(C), ВА
ОМХ1 (K1 – 10 кВ СТ)	10	0	0	10	0	0
ОМХ2 (K2 – 0,4 кВ СТ)	14	0	0	14	0	0
ОМХ3 (K4 – T2)	45	-	-	45	-	-
Приборы	Фазные токи			Коэффициенты мощности		
	I(A), А	I(B), А	I(C), А	cos φ(A), безразм.	cos φ(B), безразм.	cos φ(C), безразм.
ОМХ1 (K1 – 10 кВ СТ)	0,111	0,056	0,056	0,99	0,99	0,99
ОМХ2 (K2 – 0,4 кВ СТ)	1,701	0	0	0,99	1	1
ОМХ3 (K4 – T2)	1,701	-	-	0,99	-	-

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

С использованием коэффициентов подобия был осуществлен пересчёт значений на промышленные параметры для сельской электрической сети 0,4 кВ, питание которой осуществляется от трансформатора ТМ 250 кВА 10/0,4 кВ со схемой и группой соединения обмоток Y/Yn и с использованием неизолированного провода А-35.

Обсуждение (Discussions)

Измеренные напряжения в рассматриваемом опыте были пересчитаны с использованием коэффициентов подобия на параметры сельской электрической сети, питания которой осуществляется от трансформатора ТМ-250 с использованием провода А-35 (рис. 3). Согласно рисунку 3, источник несанкционированного напряжения подключается к 258-ому метру линии электропередачи 0,4 кВ. Фазные напряжения на стороне высокого напряжения составляют 2579 В, 421 В и 395 В. То есть напряжение

между фазой А и нейтралью $U(A-N)$ составляет 45% от номинальных 5780 В, а для фаз $U(B-N)$ и $U(C-N)$ – 7% от номинального напряжения.

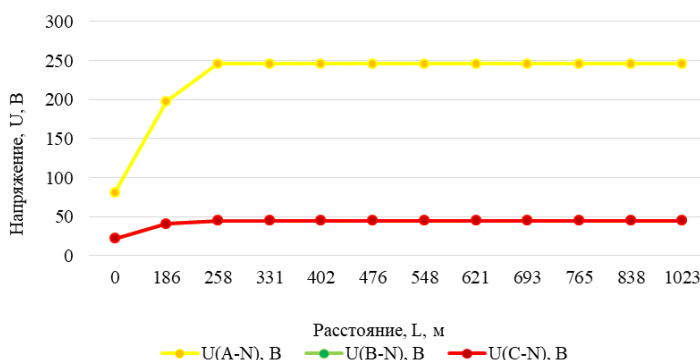


Рис. 3. Распределение напряжений в линии электропередачи 0,4 кВ

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

Исходя из результатов, представленных в таблице 2, следует, что коэффициенты активной мощности имеют значение 0,99 и являются характерными для сельских электрических сетей 0,4 кВ. При этом с помощью коэффициентов подобия было выявлено, что источник несанкционированного напряжения выдает 95,74 кВт. Исходя из значений мощности на сторонах высокого и низкого напряжения силового трансформатора, было выявлено, что потери в трансформаторе составляют 0,14 кВт, а в линии теряется 65,95 кВт. Ток модели 1,701 А на стороне 0,4 кВ соответствует току линии 362 А. Загрузка модели трёхфазного трансформатора модели составляет 70%, а источник несанкционированного напряжения Т2 выдает 41% своего номинального тока.

В ходе экспериментальных исследований режима несанкционированной подачи напряжения были получены значения напряжений на сторонах высокого и низкого напряжения силового трансформатора 10/0,4 кВ, характерные для прототипа электрической сети, питание которой осуществляется от трансформатора ТМ-250 У/Ун 10/0,4 кВ с использованием провода А-35 (табл. 3). Так, при подключении источника несанкционированного напряжения от наиболее удалённой точки сельской электрической сети 0,4 кВ до удаления от трансформатора на 258 метров мощность нагрузки на стороне 10 кВ изменялась от значения 4,23 кВт до 29,64 кВт.

Так, исходя из результатов, представленных в таблице 3, следует, что при подключении источника несанкционированного напряжения на любом удалении от силового трансформатора фазное напряжение всех фаз на стороне 10 кВ является опасным и может привести к смертельным несчастным случаям. При этом на стороне 0,4 кВ подключение источника несанкционированного напряжения на удалении 1023 м от трансформатора приводит к возникновению фазного напряжения 11 В на выводе трансформатора, а на двух других фазах – 4,4-4,6 В. В свою очередь, приближение источника несанкционированного напряжения к выводу трансформатора 0,4 кВ приводит к увеличению напряжения на выводах трансформатора. Следует отметить, что напряжения на других фазах, к которым не подключен источник несанкционированного напряжения, являются наведёнными и появляются вследствие взаимоиндукции.

Таблица 3

Table 3

Напряжения на сторонах 10/0,4 кВ силового трансформатора в зависимости от точки подключения источника несанкционированного напряжения

The voltages on the sides of the 10/0.4 kV power transformer, depending on the connection point of the unauthorized voltage source

№ п/п	Точка подключения ИИН / Расстояние L от шин трансформатора 0,4 кВ, м	Сторона 10 кВ СТ (380 В модели)			Сторона 0,4 кВ СТ (38 В модели)		
		U(A), В	U(B), В	U(C), В	U(A), В	U(B), В	U(C), В
1	K4 / 258 м	2579	421	395	81	22	22
2	K7 / 476 м	1321	203	176	42	19	19
3	K10 / 693 м	658	124	111	24	9	9
4	K13 / 1023 м	234	68	66	11	4,6	4,4

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

В ходе экспериментов были получены промышленные параметры режимов несанкционированной подачи напряжения, полученные с помощью коэффициентов подобия, для сельской электрической сети 0,4 кВ, питание которой осуществляется от трансформатора ТМ-250, при использовании нагрузки на стороне 10 кВ мощностью от 4,23 кВт до 29,64 кВт в зависимости от точки подключения источника несанкционированного напряжения в электрической сети 0,4 кВ (табл. 4-5).

Таблица 4

Table 4

Токи и нагрузка силового трансформатора и источника несанкционированного напряжения в зависимости от точки его подключения

Currents and loading of a power transformer and an unauthorized voltage source, depending on its connection point

№ п/п	Параметры стороны НН 0,4 кВ				Параметры стороны ВН 10 кВ		
	Точка подключения ИИН и расстояние L от шин 0,4 кВ, м	Ток I(A), А на стороне 0,4 кВ (38 В модели)	Загрузка СТ на вводе 0,4 кВ, β, %	Загрузка ИИН β, %	Ток I(A), А на стороне 10 кВ (380 В модели)	Ток I(B), А на стороне 10 кВ (380 В модели)	Ток I(C), А на стороне 10 кВ (380 В модели)
1	K4 / 258 м	362	70	41	10	5,1	5,1
2	K7 / 476 м	262	51	29	7,4	3,7	3,7
3	K10 / 693 м	203	39	23	5,7	2,8	2,8
4	K13 / 1023 м	141	27	16	4	2	2

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

Таблица 5

Table 5

Мощности в электрической сети и потери мощности в зависимости от точки подключения источника несанкционированного напряжения

Power in the electrical network and power loss depending on the connection point of the unauthorized voltage source

№ п/п	Точка подключения ИИН и расстояние L от шин 0,4 кВ, м	Мощность на выводе ИИН (T2), P(A), кВт	Мощность на вводе СТ (T1), P(A), кВт	Потери мощности в линии, ΔP(L), кВт	Суммарная мощность на стороне 10 кВ, ΣP 10кВ, кВт	Потери мощности в трансформаторе, ΔP(T), кВт
1	K4 / 258 м	95,74	29,79	65,95	29,64	0,14
2	K7 / 476 м	70,21	10,64	59,57	10,57	0,07
3	K10 / 693 м	53,19	4,26	48,93	4,23	0,03
4	K13 / 1023 м	36,17	0	36,17	0	0

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

В результате проведенного экспериментального исследования режимов несанкционированной подачи напряжения на физической модели сельской электрической сети 10/0,4 кВ с помощью коэффициентов подобия было выявлено, что при приближении источника несанкционированного напряжения к выводу трансформатора 0,4 кВ происходит увеличение токов и мощностей в электрической сети.

Следует отметить, что полученные результаты характерны для симметричной нагрузки на стороне 10 кВ мощностью от 4,23 кВт при подключении источника несанкционированного напряжения в наиболее удаленной точке электрической сети 0,4 кВ до 29,64 кВт при подключении ИИН на удалении 258 метров от трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ.

Рассмотрим также результаты экспериментальных исследований при нагрузке №2 со стороны 10 кВ. Так, были получены электрические параметры режима несанкционированной подачи напряжения в сельской электрической сети 0,4 кВ, питание которой осуществляется от трансформатора ТМ-250 с использованием провода А-35, при использовании симметричной нагрузки на стороне 10 кВ мощностью не более 3 кВт (табл. 6).

Таблица 6

Table 6

Напряжения на сторонах 10/0,4 кВ силового трансформатора в зависимости от точки подключения источника несанкционированного напряжения

The voltages on the sides of the 10/0.4 kV power transformer, depending on the connection point of the unauthorized voltage source

№ п/п	Точка подключения ИИН и расстояние L от шин 0,4 кВ, м	Сторона 10 кВ СТ (380 В модели)			Сторона 0,4 кВ СТ (38 В модели)		
		U(A), В	U(B), В	U(C), В	U(A), В	U(B), В	U(C), В
1	K4 / 258 м	4132	3342	2421	171	109	74
2	K7 / 476 м	3842	3000	1947	154	103	62
3	K10 / 693 м	3684	2737	1658	143	98	56
4	K13 / 1023 м	3610	2402	1302	132	93	49

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

В данных опытах напряжения имеют большие значения, чем при использовании нагрузки №1 на стороне 10 кВ мощностью 4,23-29,64 кВт. Например, фазное напряжение U(A-N) со стороны 10 кВ в 1,6-15,4 раза больше, чем при симметричной нагрузке на стороне 10 кВ мощностью 4,23-29,64 кВт, а фазные напряжения U(B-N) и (C-N) в 6,1-35,3 раза больше. При этом со стороны 0,4 кВ фазное напряжение U(A-N) больше в 2,1-12 раз для аналогичных точек подключения источника несанкционированного напряжения, а фазные напряжения U(B-N) и U(C-N) в 3,4-20,2 раза больше.

В опытах холостого хода напряжения как на вводе 10 кВ трёхфазного трансформатора, так и на выводе 0,4 кВ фактически совпадают с параметрами при использовании симметричной нагрузки №2 мощностью 3 кВт и отличаются не более, чем в 1,1 раза. Также друг от друга незначительно отличалось распределение мощностей в электрической сети 0,4 кВ при холостом ходе и нагрузке со стороны 10 кВ мощностью 3 кВт.

Таким образом, нагрузка №2 на стороне 10 кВ мощностью 3 кВт, практически соответствует режиму холостого хода трансформатора. При этом использование нагрузки №1 мощностью 4,23-29,64 кВт со стороны 10 кВ трансформатора, значение которой изменялось в зависимости от точки подключения источника несанкционированного напряжения, позволяет выявить минимальные значения напряжений, характерные при несанкционированной подаче напряжения в сельскую электрическую сеть 10/0,4 кВ.

Закключение (Conclusions)

В результате проведённого исследования можно сделать следующие выводы:

1) в настоящее время существует опасность возникновения несанкционированного напряжения в сельских электрических сетях 0,4 кВ, которое, посредством обратной трансформации на трансформаторной подстанции может быть подано на сторону 10 кВ;

2) для исследования режима обратной трансформации в электрической сети 0,4 кВ была разработана физическая модель, которая позволяет исследовать режим подачи несанкционированного напряжения со стороны 0,4 кВ, а полученные при экспериментальных исследованиях электрические параметры пересчитывать на промышленные с использованием коэффициентов подобия. Для проведения исследования был использован однофазный источник несанкционированного напряжения, мощность которого составила 62,5% мощности питающего трансформатора. Пересчёт измеренных значений осуществлялся для сельской электрической сети 0,4 кВ, питание которой осуществляется от трансформатора ТМ-250 с использованием неизолированного провода А-35;

3) было выявлено, что подключение однофазного источника несанкционированного напряжения в сеть 0,4 кВ в зависимости от удаления его от трансформатора 10/0,4 киловольт приводит к появлению значений напряжения на выводе 0,4 кВ трансформатора от 11 В до 81 В (при приближении к началу отходящей от трансформатора линии) на фазе, к которой подключен источник несанкционированного напряжения. На стороне 10 кВ при этом напряжение изменяется от 234 В до 2579 В. Напряжения двух других фаз на стороне 10 кВ составляют от 66 В до 421 В, а на стороне 0,4 киловольт – от 4,4 В до 22 В. Данные напряжения характерны для нагрузки со стороны 10 кВ мощностью 4,23-29,64 кВт, значения которой меняются по причине изменения места подключения источника несанкционированного напряжения в электрической сети 0,4 кВ.

Литература

1. Batra P.E., Ioannides M.G. Assessment of electric accidents in power industry. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries. 2002;12(2):151-169. <https://doi.org/10.1002/hfm.10005>.
2. Мюльбаер А.А. Анализ причин несчастных случаев при работах на воздушных линиях электропередачи, находящихся под наведённым напряжением // Новое в российской электроэнергетике. 2017. № 4. С. 71-77. EDN: YQFURN.
3. Муссонов Г.П., Снопкова Н.Ю. Исследование наведённых напряжений на отключенных воздушных линиях электропередачи с двуполными опорами // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. №7(102). С. 187-194. EDN: UBLOPN.
4. Залесова О.В., Селиванов В.Н. Расчет наведённого напряжения на отключенных линиях электропередачи 110 кВ // Труды Кольского научного центра РАН. 2015. №2(28). С. 87-98. EDN: UYVJYB.
5. Мюльбаер А.А. Особенности расчета наведённого напряжения на отключенной цепи двухцепной воздушной линии электропередачи // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2016. №3(64). С. 146-160. EDN: WWTLYV.
6. Залесова О.В. Исследование влияния гроззащитного троса на величину наведённого напряжения на отключенной ВЛ // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 9, №8(17). С. 102-108. DOI 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8.102-108. EDN: MFTEXQ.
7. Виноградов А.В., Хименко А.В., Лансберг А.А. Анализ несчастных случаев в электросетевых компаниях // Агроинженерия. 2024. Т. 26, №2. С. 78-85. DOI 10.26897/2687-1149-2024-2-78-85. EDN: NSPOBM.
8. Иконников А., Парахин А. Использование передвижных электроустановок обратной трансформации // Электроэнергия. Передача и распределение. S2(29). 2023. С. 28-32. EDN: GRDPPS.
9. Иванов Р.В. Опыт применения в распределительных сетях 6-10 кВ областных филиалов «Россети Московский регион» передвижных электроустановок обратной трансформации 0,4/10(6) кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. №1(58). 2020. С. 106-111. EDN: DLNCGF.
10. Рогачева А., Курхули Г., Плотицын В. Опыт внедрения обратной трансформации 0,4/20 кВ с использованием установок резервной генерации // Электроэнергия. Передача и распределение. S1(28). 2023. С. 12-17. EDN: YLSVCF.
11. Толмачев Д., Багаев Д., Александров А. Многофункциональная автономная мобильная установка плавки гололеда на ВЛ на базе передвижной электроустановки обратной трансформации 0,4/10-6 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. S1(28). 2023. С. 28-32. EDN: UONTFF.
12. Попова М.В., Струков А.Н., Малышкин С.А. Резервирование электроэнергии с помощью дизельного генераторного устройства на объектах АПК // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. 2020. №34(39). С. 84-88. EDN: IYOODD.
13. Гусаров В.А., Баранов А.Ю. Автономное электроснабжение сельского жилого дома при использовании источников возобновляемой энергии и ДЭС для резерва // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. №1(30). С. 58-66. EDN: ODDOQC.
14. Суслов К.В., Шушпанов И.Н., Воронцов Д.В. Использование возобновляемых источников энергии для питания собственных нужд нефтепровода // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20, № 1-2. С. 70-79. EDN: XWBLNZ.
15. Воронцов Д.В., Уколова Е.В., Шушпанов И.Н. Виртуальные станции для электроснабжения аварийных задвижек магистральных нефтепроводов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20, №9(116). С. 86-94. DOI 10.21285/1814-3520-2016-9-86-94. EDN: WMWEYF.
16. Шушпанов И.Н., Уколова Е.В. Применение возобновляемых источников электроэнергии для питания собственных нужд нефтегазопроводов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2016. № 11-12. С. 74-81. EDN: XWVZBH.
17. Глушкова А.И., Долгопол Т.Л., Воробьева Д.Ю. Сравнительный анализ способов повышения надежности электроснабжения угольных шахт Кузбасса // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. №6(118). С. 140-145. EDN: XVKMYJ.
18. Виноградов А.В., Панфилов А.А. Оценка вероятности несанкционированной подачи напряжения в сельских электрических сетях 0,4-10 кВ // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2024. Т. 71, №2. С. 29-36. DOI 10.22314/2658-4859-2024-71-2-29-36. EDN: TPLJYA.
19. Лансберг А.А., Виноградов А.В. Разработка физической модели сельской электрической сети 0,4 кВ // Техника и оборудование для села. 2024. №8. С. 39-43. DOI: 10.33267/2072-9642-2024-8-39-43. EDN: YRWLCA.
20. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Сорокин Н.С. Характеристика электросетевых компаний по количеству и протяженности линий электропередачи, мощности подстанций //

Авторы публикации

Лансберг Александр Александрович – младший научный сотрудник ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Россия. lansbergaa@vk.com

Виноградов Александр Владимирович – д-р техн. наук, доцент, главный научный сотрудник ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Россия.

Панфилов Александр Александрович – аспирант ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет», г. Орёл, Россия.

References

1. Batra P.E., Ioannides M.G. Assessment of electric accidents in power industry. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries. 2002;12(2):151-169. <https://doi.org/10.1002/hfm.10005>.
2. Mulbayer A.A. 2017. Analysis of the causes of accidents during work on overhead power transmission lines under induced voltage // New in the Russian electric power industry. №4. pp. 71-77. EDN: YQFURH.
3. Musonov G.P., Snopkova N.Yu. 2015. Investigation of induced voltages on disconnected overhead power lines with double-chain supports // Bulletin of the Irkutsk State Technical University. №7(102). pp. 187-194. EDN: UBLOPN.
4. Zalesova O.V., Selivanov V.N. 2015. Calculation of induced voltage on disconnected 110 kV power lines // Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. №2(28). pp. 87-98. EDN: UYBJYB.
5. Mulbayer A.A. 2016. Features of the calculation of induced voltage on a disconnected circuit of a two-chain overhead power transmission line // Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University. №3(64). pp. 146-160. EDN: WWTLYV.
6. Zalesova O.V. 2018. Investigation of the effect of a lightning protection cable on the magnitude of induced voltage on a disconnected overhead line // Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Vol. 9, №8(17). pp. 102-108. DOI 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8.102-108. EDN: MFTEXQ.
7. Vinogradov A.V., Khimenko A.V., Lansberg A.A. Analysis of accidents in electric grid companies // Agroengineering. Vol. 26, №2. 2024. pp. 78-85. DOI 10.26897/2687-1149-2024-2-78-85. EDN: NSPOBM.
8. Ikonnikov A., Parakhin A. 2023. The use of mobile electrical installations of reverse transformation // Electricity. Translation and distribution. S2(29). C. 28-32. EDN: GRDPPS.
9. Ivanov R.V. 2020. Experience of using 0.4/10(6) kV mobile reverse transformation electrical installations in the distribution networks of 6-10 kV regional branches of Rosseti Moscow Region // Electric Power. Transmission and distribution. №1(58). pp. 106-111. EDN: DLNCGF.
10. Rogacheva A., Kurkhuli G., Plotitsyn V. 2023. Experience in implementing 0.4/20 kV reverse transformation using backup generation units // Electricity. Translation and distribution. S1(28). C. 12-17. EDN: YLSVCF.
11. Tolmachev D., Bagaev D., Alexandrov A. 2023. Multifunctional autonomous mobile ice melting plant on overhead lines based on a mobile electrical installation of reverse transformation 0.4/10-6 kV // Electric power. Transmission and distribution. S1(28). C. 28-32. EDN: UONTFF.
12. Popova M.V., Strukov A.N., Malyshkin S.A. Reservation of electricity using a diesel generator set at agricultural facilities // Bulletin of the Russian State Agrarian Correspondence University. 2020. No.34(39). pp. 84-88. EDN: IYOODD.
13. Gusarov V.A., Baranov A.Yu. Autonomous power supply of a rural residential building using renewable energy sources and DES for reserve // Innovations in agriculture. 2019. No.1(30). pp. 58-66. EDN: ODDOQC.
14. Suslov K.V., Shushpanov I.N., Vorontsov D.V. The use of renewable energy sources to power the pipeline's own needs // Izvestia of Higher educational institutions. Energy problems. 2018. Vol. 20, No. 1-2. pp. 70-79. EDN: XWBLNZ.

15. Vorontsov D.V., Ukolova E.V., Shushpanov I.N. Virtual stations for power supply of emergency valves of main oil pipelines // Bulletin of the Irkutsk State Technical University. 2016. Vol. 20, No. 9(116). pp. 86-94. DOI 10.21285/1814-3520-2016-9-86-94. EDN: WMWEYF.

16. Shushpanov I.N., Ukolova E.V. The use of renewable energy sources to power their own needs of oil and gas pipelines // Electrical equipment: operation and repair. 2016. No. 11-12. pp. 74-81. EDN: XWVZBH.

17. Glushkova A.I., Dolgopol T.L., Vorobyova D.Yu. Comparative analysis of ways to improve the reliability of power supply to Kuzbass coal mines // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2016. No.6(118). pp. 140-145. EDN: XVKMYJ.

18. Vinogradov A.V., Panfilov A.A. 2024. Assessment of the likelihood of unauthorized power supply in rural electric networks of 0.4-10 kV // Electrotechnology and electrical equipment in the agro-industrial complex. Vol. 71, №2. pp. 29-36. DOI 10.22314/2658-4859-2024-71-2-29-36. EDN: TPLJYA.

19. Lansberg A.A., Vinogradov A.V. 2024. Development of a physical model of a 0.4 kV rural electric network // Machinery and equipment for rural areas. №8. pp. 39-43. DOI: 10.33267/2072-9642-2024-8-39-43. EDN: YRWLCA.

20. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Sorokin N.S. 2022. Characteristics of electric grid companies by the number and length of power transmission lines, substation capacity // Electrical technologies and electrical equipment in the agro-industrial complex. Vol. 69. №2(47). pp. 31-41. DOI 10.22314/2658-4859-2022-69-2-31-41. EDN: AJQSZN.

Authors of the publication

Alexander A. Lansberg – Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia.
lansbergaa@vk.com

Alexander V. Vinogradov – Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia.

Alexander A. Panfilov – Oryol State Agrarian University, Orel, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено 26.10.2024 г.

Отредактировано 05.11.2024 г.

Принято 15.11.2024 г.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СУХОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА СОСТОЯНИЕ ЕГО ИЗОЛЯЦИИ

Балобанов Р.Н., Булатов В.М.

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

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ* Численное моделирование режимов работы изоляции сухих трансформаторов актуально в связи с необходимостью повышения надежности и эффективности современных энергосистем, поскольку позволяет оптимизировать их эксплуатационные характеристики. В свою очередь, современные программные средства обеспечивают детализированный анализ сложных физических процессов, что способствует снижению затрат на натурные эксперименты и улучшению экономической обоснованности предлагаемых решений. Прогнозирование срока службы изоляции с использованием численного моделирования и предупреждение аварийных ситуаций критически важны для поддержания стабильности электроснабжения. **ЦЕЛЬ.** Разработка численной модели сухого трансформатора. Проведение исследований влияния различных режимов работы на состояние изоляции сухих трансформаторов. **МЕТОДЫ.** При решении поставленной цели использовался метод численного моделирования работы сухих трансформаторов, реализованный в среде программного обеспечения COMSOL Multiphysics. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Результаты исследования демонстрируют возможность на основе современных численных моделей прогнозировать тепловые и электрические процессы в изоляции сухих трансформаторов, что способствует продлению срока службы последних. Существующие режимы работы трансформаторов позволяют оптимизировать их параметры для повышения эффективности функционирования, в том числе и снижения электрических потерь. Результаты моделирования показывают взаимосвязь между параметрами режимов работы сухого трансформатора и состоянием его изоляции, что способствует своевременному обнаружению и устранению возможных неисправностей. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** В результате исследования на основе разработанной численной модели были проанализированы существующие режимы работы трансформатора с сухой изоляцией, и исследованы их влияния с учетом температуры нагрева обмоток трансформатора.

Ключевые слова: трансформатор с литой изоляцией; нагрев; бросок тока намагничивания; переходный процесс; феррорезонанс.

Для цитирования: Балобанов Р.Н., Булатов В.М. Анализ влияния режимов работы сухого трансформатора на состояние его изоляции // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 1. С. 70-87. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-70-87.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF OPERATING MODES OF A DRY TRANSFORMER ON THE CONDITION OF ITS INSULATION

Balobanov R.N., Bulatova V.M.

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

Abstract: *RELEVANCE* Numerical simulation of the isolation modes of dry transformers is relevant due to the need to improve the reliability and efficiency of modern power systems, as it allows to optimize their operational characteristics. In turn, modern software tools provide a detailed analysis of complex physical processes, which helps to reduce the cost of field

experiments and improve the economic feasibility of the proposed solutions. Predicting the insulation life using numerical modeling and emergency prevention are critically important for maintaining the stability of the power supply. purpose. Development of a numerical model of a dry transformer. Conducting studies of the influence of various operating modes on the insulation condition of dry transformers. METHODS. To achieve this goal, the method of numerical simulation of the operation of dry transformers was used, implemented in the COMSOL Multiphysics software environment. results. The results of the study demonstrate the possibility of predicting thermal and electrical processes in the insulation of dry transformers based on modern numerical models, which helps to extend the service life of the latter. The existing operating modes of transformers make it possible to optimize their parameters to increase operational efficiency, including reducing electrical losses. The simulation results show the relationship between the parameters of the dry transformer operating modes and the state of its insulation, which contributes to the timely detection and elimination of possible malfunctions. conclusion. As a result of the study, based on the developed numerical model, the existing operating modes of a transformer with dry insulation were analyzed, and their effects were investigated taking into account the heating temperature of the transformer windings.

Keywords: cast resin transformer; heating; magnetization current surge; transient; ferroresonance.

For citation: Balobanov R.N., Bulatova V.M. Analysis of the influence of operating modes of a dry transformer on the condition of its insulation. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (1): 70-87. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-70-87.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature Review)

Трансформаторы играют важную роль в системе электроснабжения, обеспечивая преобразование напряжения переменного тока для эффективного распределения электроэнергии. Среди различных типов трансформаторов сухие трансформаторы выделяются благодаря своей безопасности и низким эксплуатационным затратам. В отличие от традиционных масляных трансформаторов, сухие трансформаторы используют изоляционные материалы без применения жидкостей, что снижает риск возгорания и загрязнения окружающей среды.

Сухие трансформаторы производятся в двух основных классах напряжения — 6 кВ и 10 кВ — и благодаря своей инновационной конструкции находят широкое применение как в городской инфраструктуре, так и в промышленности, обеспечивая высокие стандарты экологической безопасности [1]. Одной из ключевых особенностей их конструкции, адаптированной для работы в условиях допустимых гармоник, является значительное снижение энергетических потерь. Отсутствие необходимости в радиаторах и расширительных баках делает их особенно компактными и удобными для установки в условиях ограниченного пространства. При эксплуатации в роли тяговых преобразователей, важно, чтобы такие трансформаторы были готовы к частым колебаниям в электрической сети и могли выдерживать значительное тепловое воздействие [2].

Надежность и безопасность сухих трансформаторов зависят от качества изоляции обмоток, а эффективность их работы от технологии производства, включая вакуумную формовку и изоляцию компаундом. Преимущества сухих трансформаторов включают.

1. **Безопасность.** Отсутствие масла снижает риск возгорания и делает трансформаторы более безопасными для установки внутри зданий и в общественных местах. Это особенно важно в условиях, где пожаро- и взрывоопасность являются критическими факторами.

2. **Экологичность.** Поскольку используется сухая изоляция, снижаются риски загрязнения окружающей среды в случае утечек, что делает сухие трансформаторы более экологически безопасными.

3. **Низкие эксплуатационные требования.** Такие трансформаторы требуют минимального обслуживания, так как у них нет необходимости в замене или проверке изоляционного масла, что снижает операционные затраты и затраты на техническое обслуживание.

4. **Простота установки.** Более компактные и легкие, эти трансформаторы не требуют специальных подготовленных площадок или дорогостоящих систем защиты от

утечек масла, что упрощает их установку и снижает начальные затраты.

5. Устойчивость к неблагоприятным условиям. Сухие трансформаторы могут быть более устойчивыми к перепадам температур, влажности и другим неблагоприятным условиям окружающей среды, что позволяет использовать их в разнообразных климатических зонах.

6. Минимальные электромагнитные помехи. Конструкция сухих трансформаторов часто способствует снижению уровня электромагнитных помех, что может быть важным в местах с высокими требованиями к качеству электроснабжения, например, в больницах или на предприятиях электроники.

7. Низкий уровень шума. Сухие трансформаторы часто работают с меньшим выделением шумовой компоненты, чем их масляные аналоги, что может быть критически важным в городских условиях или вблизи жилых районов.

При анализе различий между трансформаторами с литой изоляцией и воздушно-барьерной изоляцией, важно отметить, что первые более уязвимы к перегрузкам. Это объясняется тем, что обмотки окружены специальным компаундом, который со временем может разрушаться под воздействием систематических перегрузок. Воздушно-барьерная изоляция таких проблем не испытывает, поскольку воздух, служащий изолятором, обновляется во время эксплуатации, что позволяет этим трансформаторам справляться с высокими динамическими и тепловыми нагрузками.

Однако у воздушных трансформаторов есть риски, включая воздействие повышенной влажности, загрязнений, химикатов и условий окружающей среды. Выше обозначенные риски определяются условиями эксплуатации и приводят к ограничению производительности и срока службы обоих типов изоляции. Поэтому необходимо учитывать климатическое исполнение рассматриваемых трансформаторов.

Из-за чувствительности к перепадам температуры, сухих трансформаторов на открытом воздухе без защитных кожухов не рекомендуется. Также, среди конструктивных недостатков можно назвать отсутствие анцапфы, вследствие чего регулировка напряжения возможна только через переключки на высоковольтной стороне. Несмотря на более высокую цену сухих трансформаторов по сравнению с масляными, их применение оправдано из-за низких эксплуатационных затрат и возможности использования внутри помещений.

Однако, не смотря на приведенные многочисленные преимущества сухих трансформаторов, в последнее время поступали многочисленные жалобы на повреждения трансформаторов с литой изоляцией. Некоторые из причин отказов представлены ниже согласно [4].

1. Тепловые перегрузки. Превышение допустимых температурных режимов может привести к деградации литой изоляции, что со временем снижает ее электрическую прочность и увеличивает риск пробоя.

2. Электрические перенапряжения. Внезапные скачки напряжения, такие как грозовые импульсы или аварийные коммутационные и феррорезонансные процессы, могут создавать напряжение, превышающее электрическую прочность изоляции.

3. Механические повреждения. Вибрации, удары или неправильное обращение в процессе транспортировки и установки могут вызвать микротрещины или другие повреждения в литой изоляции.

4. Изоляционные дефекты. Недостатки в процессе производства, такие как наличие пустот, включений или неоднородностей, провоцируют частичные разряды, что увеличивает риск пробоя.

5. Ухудшение свойств материалов. Со временем воздействия различных факторов окружающей среды, таких как влага, химические вещества и загрязнения, изменяют свойства изоляционных материалов, снижая их эффективность.

6. Неудовлетворительное техническое обслуживание. Неправильный уход или его отсутствие способствуют возникновению развивающихся дефектов или износа компонентов, что ведет к их дальнейшему повреждению.

7. Частичные разряды. Частичные разряды в сухих трансформаторах представляют собой электрические разряды, которые происходят в неполных изоляционных промежутках и не приводят к полному пробое изоляции. Они могут быть вызваны дефектами в изоляции, такими как трещины, поры или загрязнения.

Согласно статистике, основным фактором, способствующим старению изоляции, является тепловой пробой. Эта проблема особенно актуальна для сухих литых трансформаторов, где разница в коэффициентах теплового расширения между проводниками и литой изоляцией может приводить к образованию микротрещин и

частичным разрядам. Образовавшиеся микротрещины создают условия для увеличения напряженности электрического поля из-за различий в диэлектрической проницаемости. В конечном итоге это вызывает разрушение изоляции и возникновение межвиткового замыкания. Хотя такая последовательность событий кажется вероятной, в настоящее время нет достаточного количества данных для окончательного подтверждения этой гипотезы. Микротрещины могут быть обнаружены с помощью ультразвуковой дефектоскопии или других методов, предназначенных для выявления частичных разрядов. Еще одной вероятной причиной теплового пробоя является феррорезонанс, характеризующийся кратковременными критическими повышениями напряжения. В ситуациях, когда малонагруженные силовые трансформаторы подключены без требуемой фазировки, феррорезонансные перенапряжения могут возникать как на стороне высокого, так и на стороне низкого напряжения. Эти перенапряжения значительно увеличивают токи в обмотках трансформатора, что представляет угрозу для его изоляции. *COMSOL Multiphysics*, как универсальное средство для численного моделирования, предоставляет возможности для многокомпонентного анализа температурных полей [6]. Задача моделирования тепловых процессов в трансформаторах сводится к решению проблемы теплопередачи в сложных геометриях и оценке влияния различных тепловых режимов на изоляционную конструкцию трансформатора [7, 8].

В работах, посвященных моделированию сухих трансформаторов, акцентируется внимание на параметрах, определяющих распределение температуры: теплопроводность материалов, конвекция и тепловое излучение [9]. Также рассматриваются различные сценарии эксплуатации, включая перегрузочные режимы и влияние окружающей среды на тепловое состояние трансформатора [10].

Большое внимание уделяется валидации моделирования результатов с экспериментальными данными, что позволяет увеличить доверие к численным методам и уточнять параметры модели для повышения её точности [11, 12]. Современные исследования также часто освещают вопросы оптимизации конструкции трансформаторов на основании результатов моделирования для улучшения их тепловых характеристик [13, 14].

Таким образом, численное моделирование в программной среде, такой как *COMSOL*, играет важную роль в исследовании и разработке сухих трансформаторов с литой изоляцией. Эти модели позволяют не только предсказать тепловое поведение трансформаторов в различных режимах работы, но и содействуют развитию более совершенных конструкций, что улучшает их эксплуатационные характеристики и долговечность.

Материалы и методы (Materials and methods)

Моделирование конструкции трехфазного трансформатора с литой изоляцией из компаунда, рисунок 1. В этой модели обмотки трансформатора будут залиты специальным компаундом, который обеспечивает надежную электрическую изоляцию и защищает от механических повреждений. Литая изоляция способствует равномерному распределению тепла, что улучшает тепловые характеристики устройства.

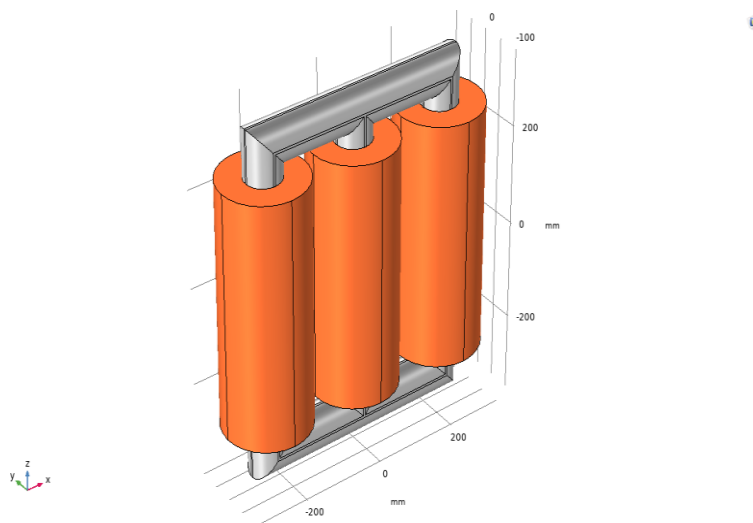


Рис.1. 3D-модель трансформатора с литой изоляцией 10/0,4 кВ в программе *COMSOL*

Fig.1. 3D model of a 10/0.4 kV cast resin transformer in *COMSOL*

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

Магнитопровод трехфазного трансформатора изготовлен из стали марки NV30S-120, отличающейся своими высокими магнитными характеристиками. Характеристики намагничивания этой стали позволяют минимизировать потери и улучшить эффективность работы трансформатора. Кривая намагничивания, приведенная на рисунке 2, демонстрирует, как материал реагирует на магнитное поле, что позволяет визуально оценить его магнитные свойства и поведение в различных режимах работы.

Характеристики трансформатора ТЛС-25 10/0,4 Д/УН-11: $S_{ном}=25$ кВА – номинальная мощность; $U_{вн}=10$ кВ – номинальное напряжение ВН; $U_{нн}=0,4$ кВ – номинальное напряжение НН; $\Delta P_{хх}=140$ Вт – потери холостого хода; $\Delta P_{кз}=530$ Вт – потери короткого замыкания; $I_{хх}=2\%$ – ток холостого хода; $u_{кз}=3,5\%$ – напряжение короткого замыкания; $R_{нн}=927 \cdot 10^{-4}$ Ом – сопротивление обмотки НН; $R_{вн}=67$ Ом – сопротивление обмотки ВН.

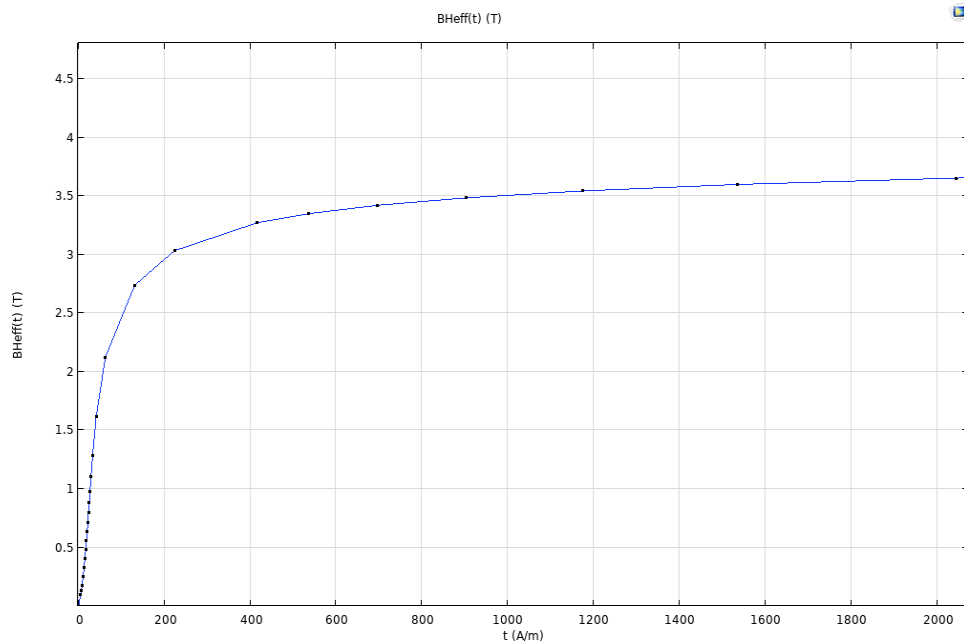


Рис.2. Кривая намагничивания стали марки NV30S-120

Fig.2. Magnetization curve of NV30S-120 steel

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

Определение электрических параметров трансформатора. Индуктивное сопротивление $X_T = 140$ Ом.

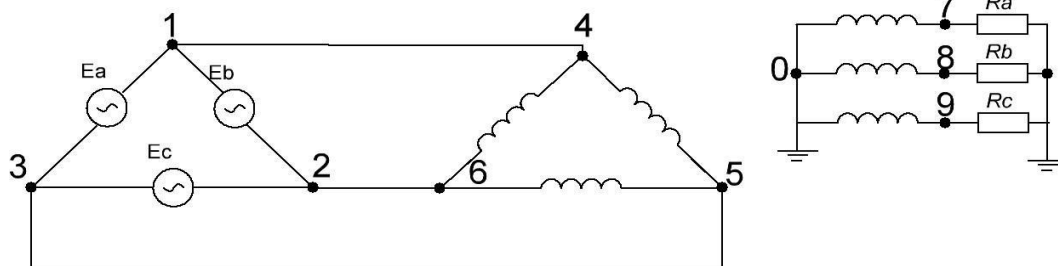


Рис.3. Электрическая схема подключения трансформатора в сеть

Fig.3. Electrical diagram for connecting a transformer to a network

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

На рисунке 3 представлена схема электрической цепи, которая была задана при моделировании трансформатора в COMSOL. В первичную цепь включен трехфазный источник напряжением 10 кВ с внутренним сопротивлением Z_c . Нагрузка вторичной цепи 0,4 кВ моделируется постоянным сопротивлением R . Параметры этой электрической цепи: $E=10$ кВ; $w_1=5097$ витков; $w_2=118$ витков; $K_T=43,2$.

Значительное внимание уделяется правильному выбору значения активного сопротивления, которое можно вычислить по формуле (1). Правильно подобранное активное сопротивление позволяет точно моделировать характерные рабочие условия трансформатора. Этот подход поможет в дальнейшем анализе и оптимизации работы трансформатора в реальных эксплуатационных условиях. Для моделирования

номинального режима работы трансформатора его нагрузка представлена в виде активного сопротивления и характеризуется формулой (1).

$$Z_{нагр} = R_{нагр} = \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}} = 6,4 \text{ Ом}$$

(1)

Рисунок 4 иллюстрирует, что действующее значение фазного тока обмотки высшего напряжения (ВН) составляет 0,85 А, так как схема соединения обмотки ВН – треугольник, то действующее значение линейного тока будет отличаться в корень из трех раз и равно 1,47 А. Для обмотки низшего напряжения (НН) действующий ток равен 36,4 А (рис. 5).

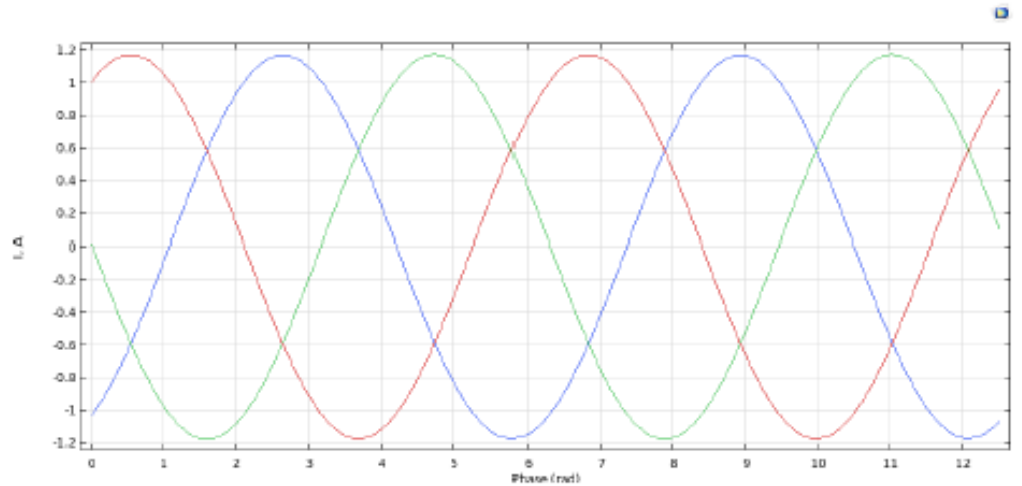


Рис.4. Осциллограмма фазного тока обмотки ВН

Fig.4. Oscillogram of the phase current of the HV winding

Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

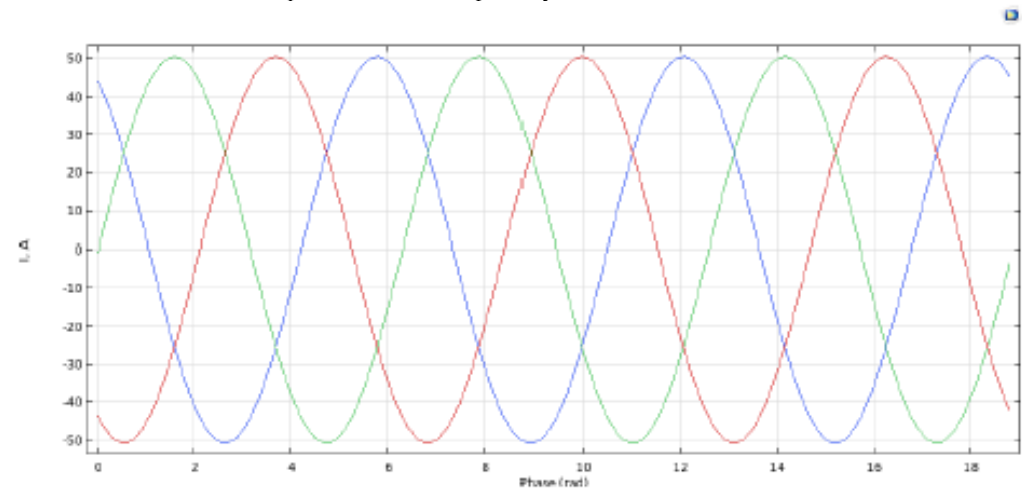


Рис.5. Осциллограмма фазного тока обмотки НН

Fig.5. Oscillogram of the phase current of the LV winding

Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В таблице 1 приведены полученные значения токов и напряжений. Данные значения соответствуют паспортным данным исследуемого трансформатора.

Таблица 1

Токи и напряжения при номинальном режиме работы трансформатора

Результаты	I_1 , А	I_2 , А	U_1 , В	U_2 , В
Паспортные данные	1,44	36,1	231	10000
COMSOL	1,47	36,4	230	10000

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

На рисунке 6 показано распределение рабочей температуры в трансформаторе после его работы на протяжении девяти часов в номинальном режиме. При этом режиме температура обмотки низшего напряжения фазы «А» достигает 38,3 °С. Рисунок 7 иллюстрирует, что наиболее высокая температура наблюдается в центральной части обмотки, так как она находится на максимальном удалении от окружающей среды, отводящей тепло. Этот факт подчеркивает важность оптимизации конструкции для эффективного управления теплом и предотвращения возможных перегревов, которые могут повлиять на долговечность и надежность трансформатора.

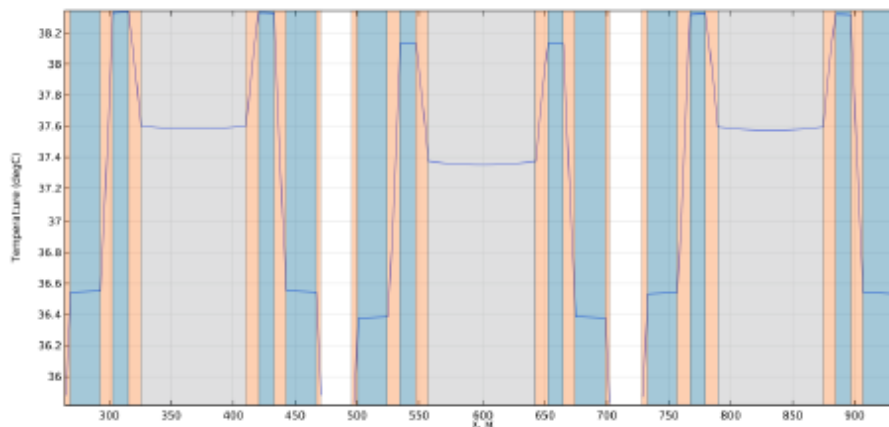


Рис.6. Распределение температуры трансформатора через время $t=9$ ч (оранжевый – изоляция; синий – обмотка; серый – сердечник)
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig.6. Transformer temperature distribution after time $t=9$ hours (orange – insulation; blue – winding; gray – core)

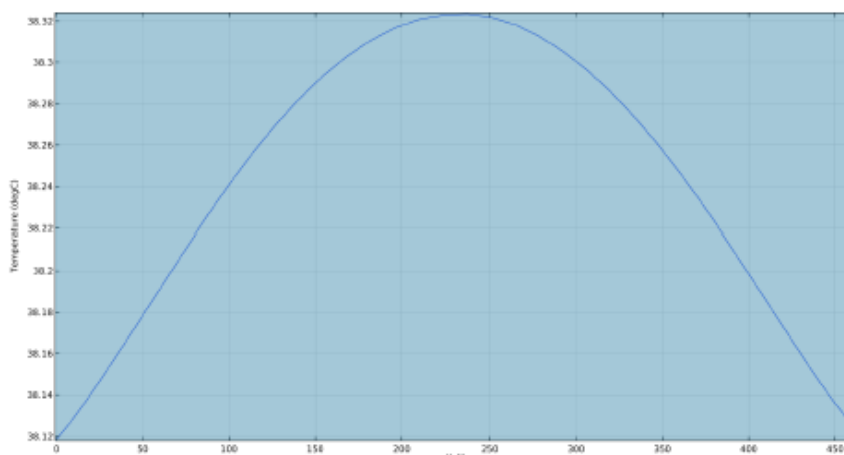


Рис.7. Температура вдоль обмотки НН фазы А через время $t=9$ ч (синий - обмотка)
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig.7. Temperature along the LV winding of phase a after time $t=9$ hours (blue - winding)

Для проведения модельного эксперимента в режиме холостого хода трансформатора внимание акцентировано на обмотке низкого напряжения, на которую подается номинальное напряжение $U_{\text{нн}}=0,4$ кВ. Необходимо отметить, что обмотка высокого напряжения при этом останется разомкнутой. Это условие дает возможность изолировать эффекты, происходящие в обмотке низкого напряжения, и исследовать их без влияния аспектов, связанных с работой обмотки высокого напряжения. В данном режиме холостого хода трансформатор продолжает функционировать, но без нагрузки, что позволяет анализировать только магнитные и электрические процессы, происходящие внутри обмотки. Полученные данные иллюстрируют поведение трансформатора в различных эксплуатационных условиях. Осциллограмма тока, регистрируемая в обмотке низкого напряжения, представлена на рисунке 8 и иллюстрирует динамику протекания тока в этом режиме.

Исследование осциллограммы представляет возможность оценить не только величину тока, но и выявить любые аномалии или отклонения, которые могут указывать на потенциальные неисправности трансформатора. Кроме того, полученные результаты модельного эксперимента можно использовать для дальнейшего моделирования и

оптимизации конструкции трансформатора, а также для разработки рекомендаций по эксплуатации и техническому обслуживанию, что в конечном итоге повысит надежность и эффективность его работы.

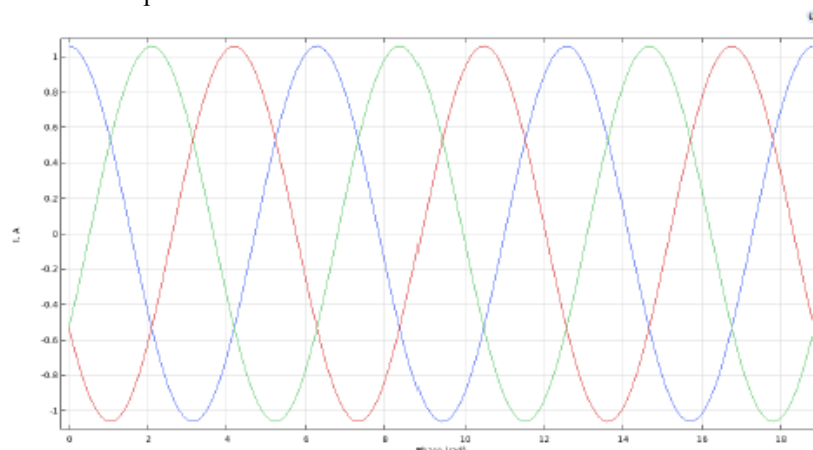


Рис.8. Осциллограмма тока обмотки НН Fig.8. Oscillogram of LV winding current
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Ток холостого хода трансформатора определяется по формуле (2):

$$I_{xx}, \% = \frac{I_{2m}}{\sqrt{2} \cdot I_{2ном}} \cdot 100 = 2,1 \% \quad (2)$$

В таблице 2 приведены результаты сравнения полученного значения тока холостого хода с паспортными данными, при этом они совпадают.

Таблица 2

Токи и напряжения при номинальном режиме работы трансформатора

Результаты	$I_{xx}, \%$	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$
Паспортные данные	2	10000	231
COMSOL	2,1	10000	230

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

Рисунок 9 иллюстрирует, что ввиду малой величины тока, нагрев обмоток в исследуемом режиме практически отсутствует.

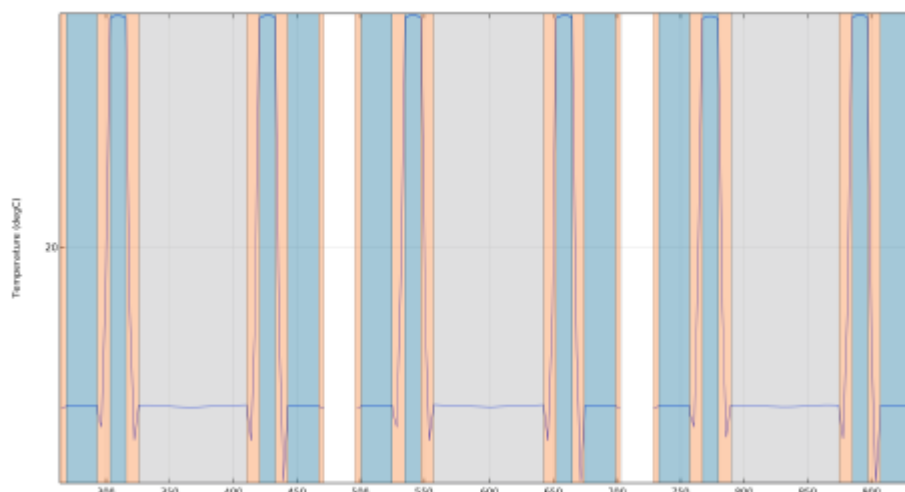


Рис.9. Распределение температуры трансформатора через время $t=9$ ч (оранжевый – изоляция; синий – обмотка; серый – сердечник) Fig.9. Transformer temperature distribution after time $t=9$ hours (orange – insulation; blue – winding; gray – core)
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Опыты короткого замыкания (КЗ) проводятся для схемы сети, представленной на

рисунке 3 при следующих условиях: $Z_{нагр}=0$; $I_1=I_{1ном}=1,44$ А.

Напряжение короткого замыкания было определено методом подбора и составило 350 В (рис. 10). При этом амплитудное значение тока первичной обмотки составило 1,5 А, что практически соответствует номинальному значению (рис. 10).

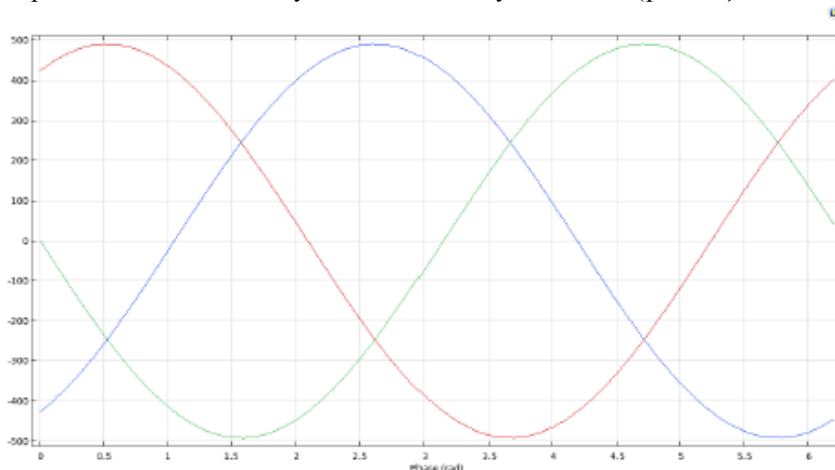


Рис.10. Осциллограмма тока обмотки ВН Fig.10. Oscillogram of HV winding current
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Значение полного сопротивления трансформатора вычисляется по формуле:

$$Z_{тр} = \frac{E_c}{I_{кзф} \cdot \sqrt{3}} = 140,3 \text{ Ом} \quad (3)$$

Напряжения короткого замыкания при этом будет равно:

$$u_k, \% = \frac{Z_{тр} \cdot S_{ном} \cdot 100}{U_{вн}^2} = 3,51 \% \quad (4)$$

Такое значение напряжения КЗ соответствует паспортным данным трансформатора.

В таблице 2 представлены результаты типовых испытаний на нагрев трансформатора ТЛС-25/10/0,4. Эти испытания имеют ключевое значение для оценки термической устойчивости и эффективности работы трансформатора в условиях короткого замыкания. Переход в режим КЗ происходит в момент времени 8:00 часов, начальная температура обмоток трансформатора при этом составляет 38 °С. Установившееся значение температуры через 9 часов после включения обмотки фазы «В» $\theta_{обм.ф.В}$ в этом режиме равно 71 °С, температура магнитопровода при этом достигает значения $\theta_{магн}=44$ °С, обмотка ВН нагревается до 63 °С.

Для более глубокого анализа и сравнения результатов расчетных данных с результатами типовых испытаний на нагрев, начальное значение температуры обмотки было установлено на уровне 38 °С, что соответствует условиям, имевшим место на момент начала испытаний. Это значение служит важным эталоном, поскольку позволяет объективно сравнить как расчетные, так и экспериментальные данные, особенно в контексте того, как изменяется температура трансформатора в режиме короткого замыкания.

Распределение температуры трансформатора по различным обмоткам во время опыта короткого замыкания через 9 часов его работы представлено на рисунке 11. Данные на рисунке 11 иллюстрируют эффект продолжительной работы трансформатора в критическом режиме. Обмотка низшего напряжения фазы «В» нагревается до 75,3 °С, в то время как обмотка высшего напряжения фазы «В» достигает температуры 69,8 °С. Эти температуры важны для понимания термических режимов работы трансформатора и могут быть использованы для дальнейшего анализа его надежности и безопасности.

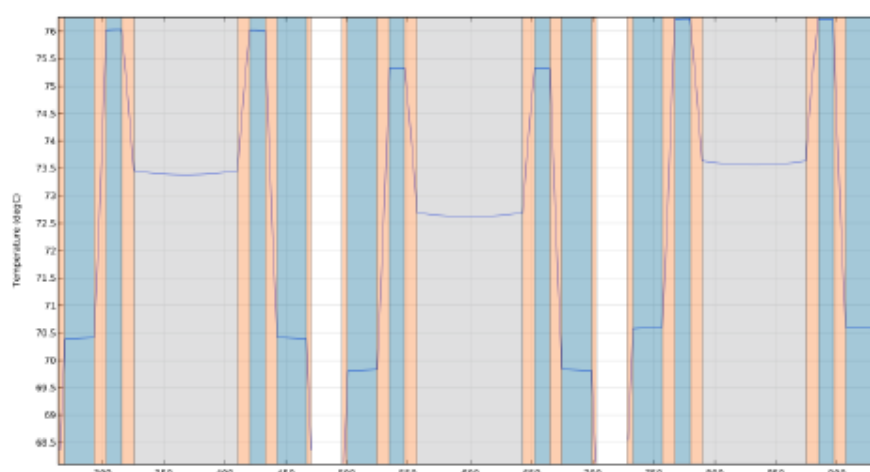
На рисунке 12 представлено сравнение нагрева обмотки низшего напряжения фазы «В» в условиях короткого замыкания, рассчитанного в программе COMSOL, с результатами, полученными в ходе испытаний. Следует отметить, что полученные результаты полностью совпадают, что, в свою очередь, подтверждает высокую точность численной модели. Это свидетельствует о том, что используемая методология численного моделирования в программном обеспечении COMSOL эффективна для прогнозирования температурных режимов сухих трансформаторов в нормальных и аварийных режимах работы.

Таблица 2

Процесс нагрева трансформатора ТЛС-25 в режимах XX и КЗ

Время чч:мм	$\theta_{\text{окр}}, ^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{магн}}, ^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{обм.ф.В}}, ^\circ\text{C}$
16:00	20	20	20
12.03.2019			
07:50	20	44	38
Переключение в режим КЗ			
8:00	20	42	38
8:30	20	38	46
9:00	21	37	50
9:30	21	36	53
10:00	21	36	56
10:30	21	36	58
11:00	21	37	60
11:30	21	38	62
12:00	21	39	64
12:30	21	39	65
13:00	21	40	66
13:30	21	41	67
14:00	21	42	68
14:30	21	42	68
15:00	21	43	69
15:30	21	43	69
16:00	21	43	70
16:30	21	44	70
17:00	21	44	71

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

Рис.11. Распределение температуры трансформатора через время $t=9$ ч (оранжевый – изоляция; синий – обмотка; серый – сердечник)Fig.11. Transformer temperature distribution after time $t=9$ hours (orange – insulation; blue – winding; gray – core)

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

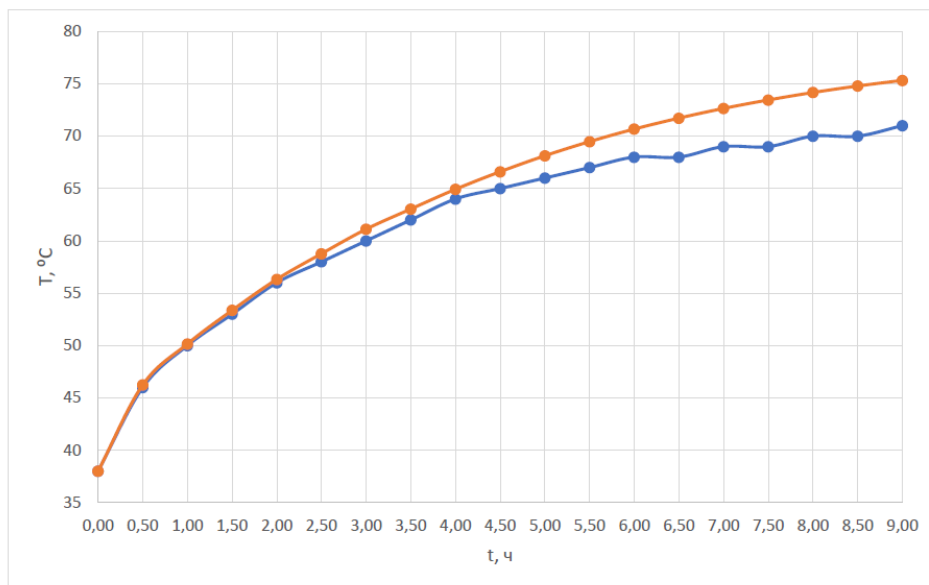


Рис.12. Изменение температуры обмотки НН фазы «В» в течение 9 часов (COMSOL – оранжевая кривая; испытание – синяя кривая)

Fig.11. Change in the temperature of the LV winding of phase “B” for 9 hours (COMSOL - orange curve; test - blue curve)

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

Таким образом, верификация численной модели проведена успешно.

Изоляция исследуемого трансформатора ТЛС-25/10/0,4 соответствует классу нагревостойкости F , что означает, что при длительной работе температура не должна превышать $155\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для анализа тепловых характеристик была проведена серия опытов, при которых изменяли ток в обмотках высшего напряжения. Результаты визуализированы в форме время-токовой характеристики и представлены на рисунке 12. Диаграмма показывает время, необходимое для достижения предельно допустимой температуры при различных значениях мощности. Эта информация позволяет оценить устойчивость трансформатора к перегрузкам, а также помогает в разработке эффективной стратегии эксплуатации для продления его срока службы. Полученные данные могут служить основой для дальнейших исследований и разработок в области улучшения тепловых характеристик трансформаторов с литой изоляцией.

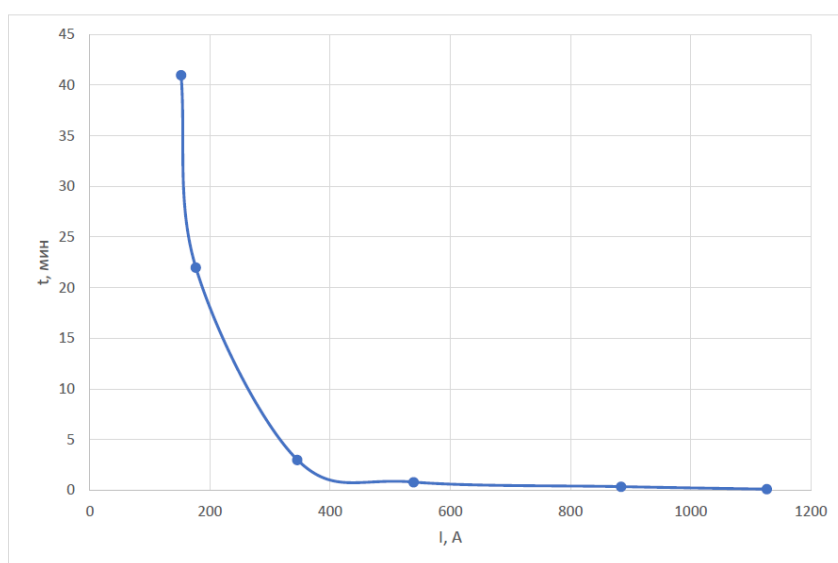


Рис.12. Время-токовая характеристика предельно допустимых режимов работы трансформатора

Fig.12. Time-current characteristics of the maximum permissible operating modes of the transformer

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

Феррорезонансные явления возникают в трехфазных сетях, когда линейные емкости и индуктивные элементы сети взаимодействуют с нелинейными индуктивностями, такими как обмотки силовых и измерительных трансформаторов, установленных на магнитопроводе определенной формы. В таких контурах феррорезонанс представляет собой нелинейный резонанс, который сопровождается значительными увеличениями напряжений на элементах цепи и токов в них [15].

Одна из ключевых причин феррорезонанса заключается в резком изменении индуктивной проводимости на землю одной из фаз во время переходных процессов. Также, избыточный заряд на емкостях сети может смещать нейтраль, что ведет к насыщению магнитопровода трансформатора на одной из фаз и создает заметную асимметрию фазных параметров относительно земли. Это смещение может усугубляться, приводя к длительно сохраняющемуся повышению напряжения в нейтрали сети [16].

Рассматривалось возникновение резонансных явлений в сети, включающей однофазный силовой трансформатор. Проведение анализа электромагнитных процессов в условиях резонанса в такой сети способствует выявлению причин повреждений в трехфазном силовом трансформаторе. Эксперимент планируется проводить с разомкнутой вторичной обмоткой. Схема сети, предназначенной для исследования, представлена на рисунке 13.

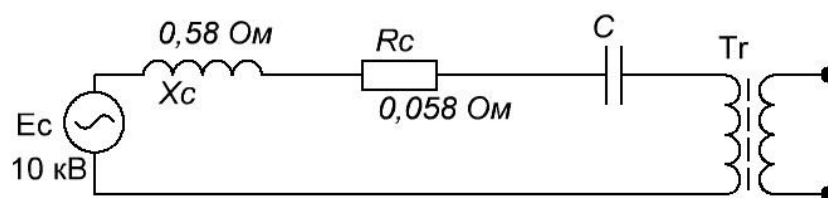


Рис.13. Расчетная схема сети

Fig.13. Program operation algorithm

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

Исследование однофазного трансформатора проводилось с использованием численной модели, созданной в программе EMTP. С помощью данной модели определялось резонансное значение емкости внешней сети. На осциллограмме, представленной на рисунке 14, показан переходный процесс сети при возникновении феррорезонанса. В этом режиме пиковое значение тока в обмотке ВН достигает 15 А, а кратность перенапряжения составляет 2,6.

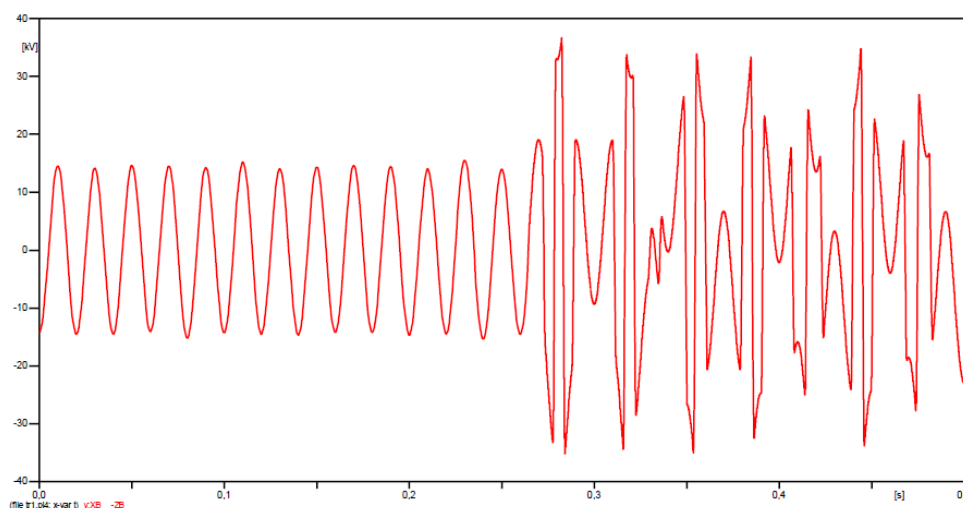


Рис.14. Осциллограммы напряжения обмотки ВН

Fig.14. Voltage oscillograms of the HV winding

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

На основании значения емкости, полученного в программе EMTP, осуществляется численное моделирование данного режима в программе COMSOL. Из-за сложности вычислений и ограничения вычислительных ресурсов было принято решение ограничить время расчета до 0,1 секунды.

На осциллограммах рисунков 15 и 16 проиллюстрировано, что пиковое значение тока составило 13,5 А, а кратность перенапряжения – 2,4, что совпадает с результатами, полученными при расчете в EMTP.

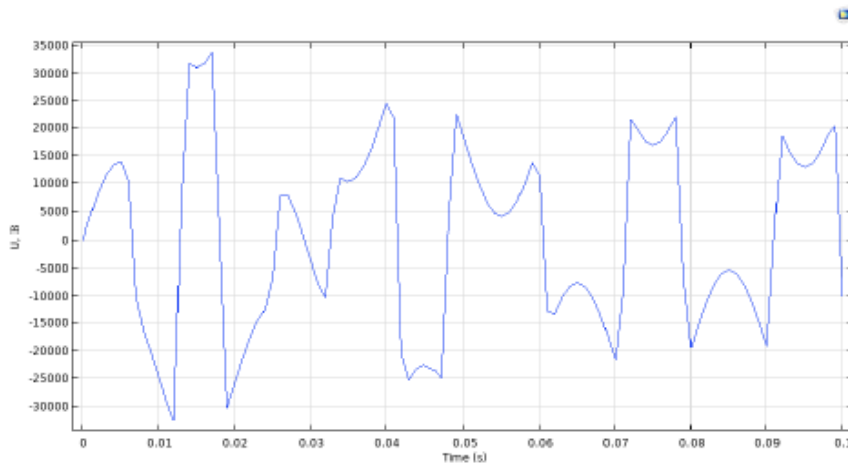


Рис.15. Осциллограмма тока обмотки ВН

Fig.15. Oscillogram of HV winding current

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

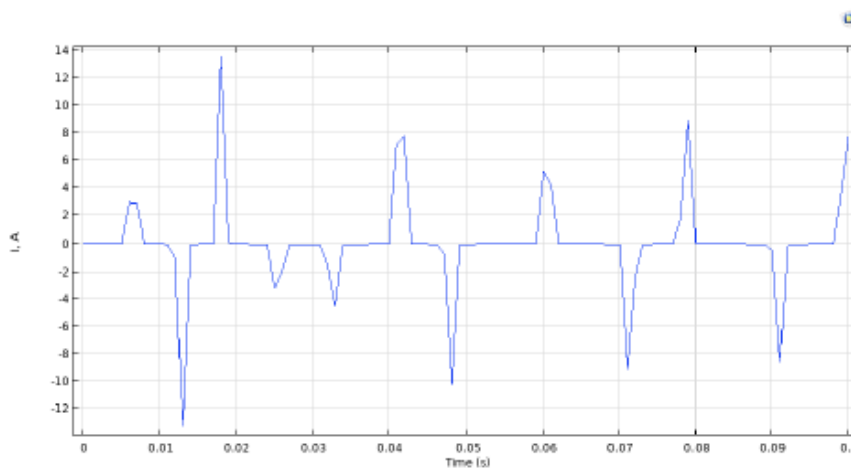


Рис.16. Осциллограмма напряжения обмотки ВН

Fig.16. Voltage oscillogram of the HV winding

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

На графике, представленном на рисунке 17, показано изменение температуры обмотки высокого напряжения за короткий промежуток времени в 0,1 секунды. За этот период температура обмотки увеличилась всего на 0,0012 °C. Такое незначительное увеличение температуры можно объяснить малым временем наблюдения и кратковременными импульсами тока, протекающего через обмотку. Поскольку нагрев трансформатора происходит по экспоненциальному закону то, для определения времени, достаточного для возникновения повреждения при данном режиме, можно использовать метод экспоненциальной экстраполяции графика изменения температуры, как показано на рисунке 16.

При построении прогнозной кривой нужно учесть, что в случае продолжительного воздействия режима нагрева температура будет увеличиваться экспоненциально и достигнет критических значений, если режим сохранится достаточно долго. Это позволит определить, какое время существования режима может быть предельным для трансформатора и потребует вмешательства для предотвращения перегрева. Постоянная времени нагрева, описывающая инерционность процесса теплопередачи, является ключевым параметром для этой оценки, поскольку она указывает на скорость достижения температуры предела нагревостойкости изоляции. Задание постоянной времени нагрева необходимо для точного расчета предельно допустимой продолжительности воздействия подобных режимов, что поможет в разработке эффективных защитных мер для управления тепловыми рисками в работе трансформатора. Постоянная времени нагрева определяется по формуле (5):

$$\tau_{\text{тепл}} = \frac{G \cdot c}{k \cdot F} = \frac{V_{\text{вн}} \cdot \rho \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot (r_4 \cdot K_2 + r_3 \cdot K_1)} = 2318 \text{ c} \quad (5)$$

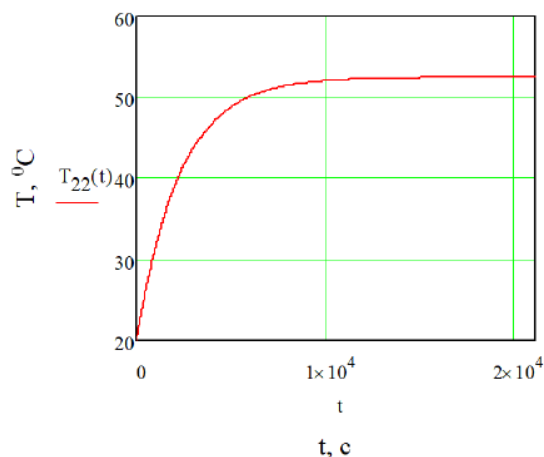


Рис.17. График изменения температуры обмотки ВН Fig.17 Program operation algorithm

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

Предельно допустимая температура для изоляции обмоток класса нагревостойкости F составляет $155\text{ }^{\circ}\text{C}$, а установившееся значение температуры в данном режиме соответствует $53\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, можно сделать вывод, что выход из строя однофазного трансформатора ввиду его перегрева в таком режиме невозможен. Однако, данный вывод был сделан из условия, что начальная температура обмотки составляет $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. На самом деле, рабочая температура обмотки ВН трансформатора в номинальном режиме составляет $33\text{ }^{\circ}\text{C}$. К тому же, при последовательном возникновении нескольких аварийных режимов обмотка трансформатора может иметь температуру значительно выше в момент феррорезонанса, что может привести к большему перегреву. Например, возникновение КЗ длительностью 1 с может привести к нагреву обмотки на $16\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Рассмотрим возможный вариант развития событий:

1) Трансформатор работает в номинальном режиме, температура обмотки ВН составляет $33\text{ }^{\circ}\text{C}$;

2) В сети возникает КЗ длительностью 1 с , температура обмотки ВН увеличивается до $49\text{ }^{\circ}\text{C}$;

3) После отключения КЗ трансформатор переходит в режим XX, в котором возникает феррорезонанс.

Используя формулу (6), можно оценить температуру обмотки при таком развитии событий.

$$\theta = \frac{I^2 \cdot R}{k \cdot F} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k \cdot F}{G \cdot c}} \right) \quad (6)$$

Трансформатор достигнет установившегося значения температуры $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ за $1,6$ часа работы. При этом проводится анализ поведения изоляции в режиме феррорезонанса в сети с трехфазным силовым трансформатором. В результате моделирования выявлено, что наличие дополнительной пары обмоток в трехфазном трансформаторе способствует повышению температуры в различных его частях по сравнению с однофазным трансформатором. Для упрощения расчета в этом исследовании несинусоидальный ток в обмотке высокого напряжения заменяется на синусоидальный ток, который имеет эквивалентное тепловое воздействие. Для реализации этой замены необходимо определить среднее значение тепловой мощности, выделяемой в обмотке высокого напряжения в течение времени расчета. Расчёт производится с использованием встроенных функций моделирования в программе *COMSOL*. В результате получено, что среднее значение тепловой мощности составляет 291 Вт .

Далее, чтобы продолжить анализ, определим действующее значение синусоидального тока по формуле (7), который окажет эквивалентное тепловое воздействие. Эта величина позволит нам моделировать реальный тепловой эффект на обмотку, что важно для корректного определения режима работы трансформатора при воздействии феррорезонанса.

$$I_{BH} = \sqrt{\frac{P_{cp}}{R_{BH}}} = 3,1\text{ А} \quad (7)$$

Режим феррорезонанса оказывает значительное влияние на тепловые характеристики трансформатора, сравнимое с работой при двухкратной перегрузке по току от номинального значения ($\approx 2 \times I_{\text{ном}}$). Это подчеркивает необходимость тщательного анализа и учета таких режимов в проектировании и эксплуатации трансформаторного оборудования.

Следующим этапом исследования явилось рассмотрение ситуации возникновения феррорезонанса в фазе «В» после устранения однофазного замыкания на землю. Начальная температура в этом случае составляет 38 °С, а вторичная обмотка трансформатора находится в разомкнутом состоянии. В результате установившееся значение температуры обмотки высокого напряжения фазы «В» достигает около 69 °С, что иллюстрируется на рисунке 18. Спустя 1,5 часа работы в таком режиме температура трансформатора снижается до 58 °С, как показано на рисунке 19. Эти колебания температуры свидетельствуют о значительном воздействии феррорезонанса на тепловые параметры устройства. Важно учитывать, что такие изменения могут привести к повышенному старению изоляции и снижению надежности трансформатора, что подчеркивает необходимость разработки мер по предотвращению и контролю подобных режимов. В таких случаях необходима установка температурных датчиков и систем мониторинга, которые способны своевременно обнаруживать и предупреждать о перегреве, а также использование автоматического вспомогательного охлаждения.

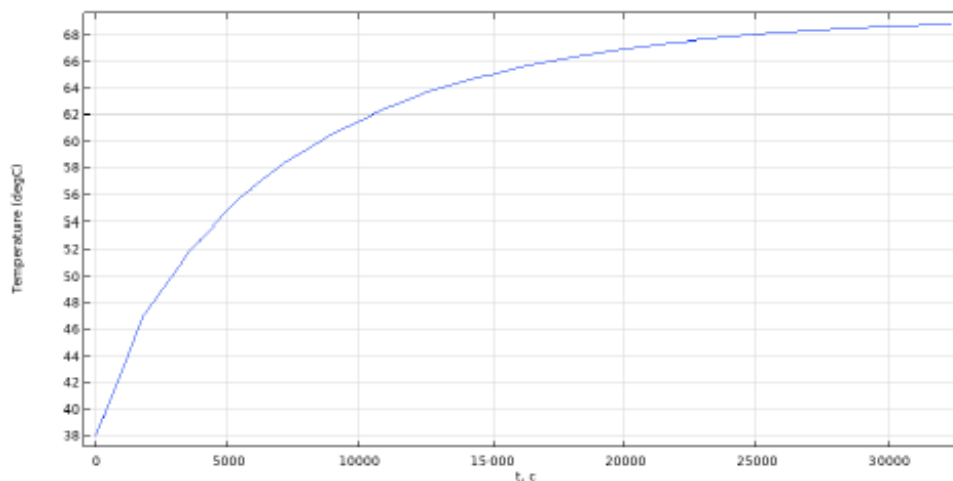


Рис.18. График изменения температуры обмотки ВН Fig.18. HV winding temperature change graph

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

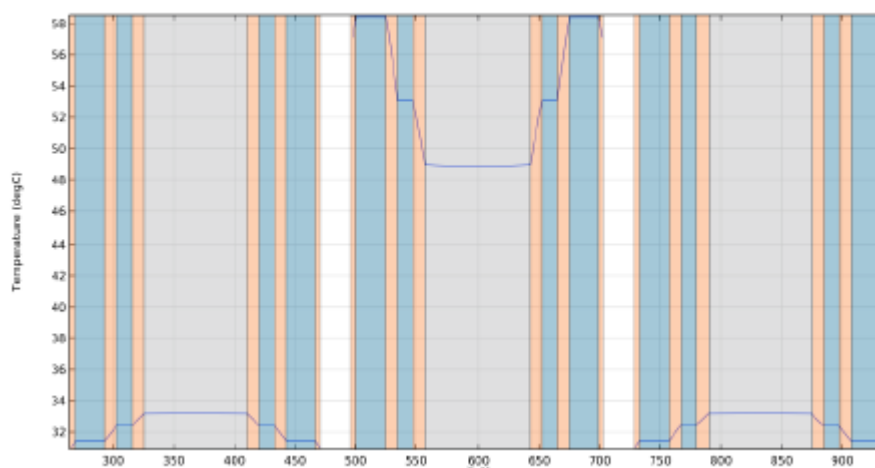


Рис.19. Распределение температуры трансформатора через время $t=9$ ч (оранжевый – изоляция; синий – обмотка; серый – сердечник)

Fig.19. Transformer temperature distribution after time $t=9$ hours (orange – insulation; blue – winding; gray – core)

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

При возникновении сценария, описанного для однофазного трансформатора, температура обмотки ВН фазы «В» возрастет до 82°С за 2,5 ч (рис. 20).

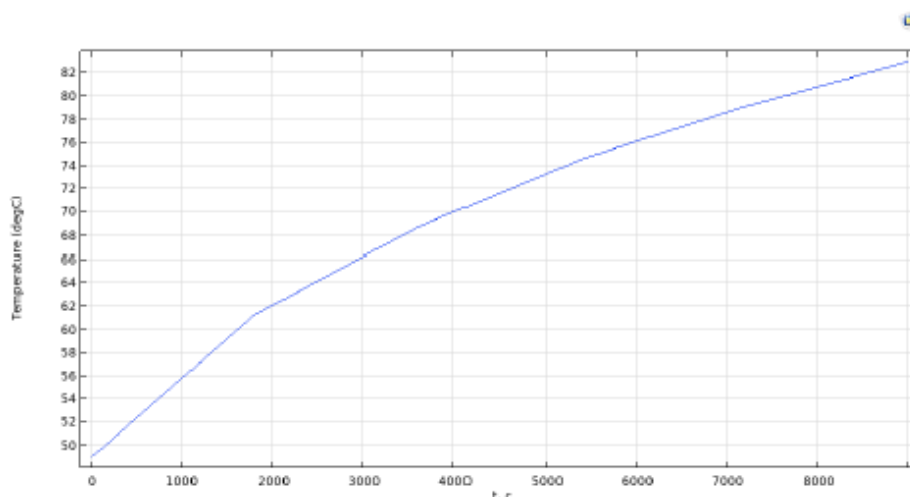


Рис.20. График изменения температуры обмотки ВН фазы «В» трансформатора

Fig.20. Graph of changes in the temperature of the HV winding of phase “B” of the transformer

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

Заклучение или Выводы (Conclusions)

Особенностью конструкции трансформатора с литой изоляцией ТЛС-25 10/0,4 Д/Ун-11 является наличие твёрдой компаундной «рубашки», которая, в отличие от масляной изоляции, слабо приспособлена к перегрузкам. Длительно существующие в электрической сети аварийные режимы, например феррорезонанс, сопровождаются увеличением рабочих токов в обмотках высшего напряжения и могут привести к перегреву и тепловому повреждению изоляции трансформатора.

Анализ переходных и установившихся режимов в сети и их влияния на нагрев сухого трансформатора в программном комплексе COMSOL была разработана численная модель трансформатора ТЛС-25 10/0,4 Д/Ун-11. Методика создания численной модели основана на задании полной геометрии трансформатора на основе данных производителя и задании уравнений и граничных условий для описания необходимых физических законов, по которым модель будет работать.

Результаты расчётов показали, что наличие в сети феррорезонанса может привести к тепловому повреждению изоляции. Такое возможно при возникновении феррорезонанса после отключения значительного возмущения в сети, например трёхфазного КЗ. При этом, в случае предварительного нагрева трансформатора до 49 °C, температура обмоток может увеличиться до 82 °C за 2,5 ч. Несмотря на то, что изоляция трансформатора относится к классу нагревостойкости F и имеет предельно допустимую температуру работы 155 °C, старение изоляции компаунда вследствие множественных перегрузок может привести к изменению свойств материала и снижению допустимой температуры.

Литература

1. Кузьмин И., Шувалов С. Зарубежный опыт эксплуатации сухих силовых трансформаторов до 72,5 кВ //Электроэнергия. Передача и распределение. – 2019. – №. S4. – С. 14-17.
2. Гандымов А. М. Экономия электрической энергии за счет замены трансформаторов масляной изоляцией на сухие //Перспективы развития науки в современном мире. – 2021. – С. 60-64.
3. Вариводов В. Н. и др. Особенности применения литой эпоксидной изоляции и композиций на ее основе для высоковольтного оборудования //Электричество. – 2024. – №. 10. – С. 67-75.
4. Воронкина А. Н., Мясоедова М. А. Краткий обзор основных неисправностей силовых трансформаторов в условиях эксплуатации //Электроэнергетика сегодня и завтра. – 2023. – С. 142-144.
5. Громыко И. Л., Мирош Д. В., Галушко В. Н. Диагностирование параметров качества изоляции обмоток трансформаторов при ее увлажнении. – 2022.
6. Вафин Д. Б., Шайхиев И. М. Опыт замены масляного трансформатора сухим трансформатором в условиях нефтехимического производства //Евразийское Научное Объединение. – 2021. – №. 5-1. – С. 27-28.
7. Волчанина М. А., Курманов Р. С., Кузнецов А. А. Моделирование тепловых характеристик силового трансформатора при переменной токовой нагрузке //Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности. – 2022. – С. 170.
8. Сарсенов А. У. Моделирование электродинамических и тепловых режимов силовых трансформаторов для оценки эффективности надежности эксплуатации //Энергетика и энергосбережение: теория и практика. – 2020. – С. 254-1-254-4.

9. Бапфутвабо Л., Кубарев А.Ю., Усачев А.Е., Бобоев Ш.А., Гарифуллин М.Ш. Исследование характеристик поверхностных частичных разрядов на границе раздела воздух/стекло между металлическими электродами // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2024. Т. 16. № 3 (63). С. 35- 43.

10. Choudhary K. 3D modelling and finite element analysis of three phase transformer with integrated inductors in COMSOL Multiphysics. – 2020.

11. Khaleel D., Tang X., Abu-Zaher M. Advanced Simulation and Empirical Validation of High-Efficiency Induction Heating System Via COMSOL Multiphysics //2024 IEEE 10th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2024-ECCE Asia). – IEEE, 2024. – С. 2912-2917.

12. Basova A. V. et al. 2D&3D models for numerical calculation of electric fields in high-voltage transformers and reactors //Transformers Magazine. – 2024. – Т. 11. – №. 1. – С. 92-104

13. Yin Q. et al. Analysis and Treatment of a Partial Discharge Fault in a 220kV Transformer //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2024. – Т. 2800. – №. 1. – С. 012020..

14. Yanjing Z. et al. Optimal Design of Dry-Type Air-Core Shunt Reactor Structure Based on Response Surface Method //Frontier Academic Forum of Electrical Engineering. – Springer, Singapore, 2025. – С. 605-613.

15. Ларин В. С., Зененко А. С., Фортальнов С. А. Перенапряжения на изоляции нейтрали сухих трансформаторов при импульсных испытаниях //Электричество. – 2024. – №. 2. – С. 11-17.

16. Гусев О. Ю., Гусев Ю. П., Южанин А. Е. Оценка термической стойкости трансформатора напряжения при броске тока намагничивания, вызванного однофазным замыканием на землю //Электричество. – 2024. – №. 8. – С. 36-41.

Авторы публикации

Балобанов Руслан Николаевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электрические станции им В.К. Шибанова», Казанский государственный технический университет, E-mail: rassel_ipek@mail.ru,

Булатова Венера Михайловна – канд. пед. наук, доцент, кафедра «Электрические станции им В.К. Шибанова», Казанский государственный технический университет, E-mail: bulatovavenera@mail.ru.

References

1. Kuz'min I., Shuvalov S. Zarubezhnyi opyt ekspluatatsii sukhikh silovykh transformatorov do 72, 5 kV //Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie. – 2019. – №. S4. – С. 14-17.

2. Gandymov A. M. Ekonomiya elektricheskoi energii za schet zameny transformatorov maslyanoi izolyatsiei na sukhie //Perspektivy razvitiya nauki v sovremennom mire. – 2021. – С. 60-64.

3. Varivodov V. N. i dr. Osobennosti primeneniya litoi epoksidnoi izolyatsii i kompozitsii na ee osnove dlya vysokovol'nogo oborudovaniya //Elektrichestvo. – 2024. – №. 10. – С. 67-75.

4. Voronkina A. N., Myasoedova M. A. Kratkii obzor osnovnykh neispravnostei silovykh transformatorov v usloviyakh ekspluatatsii //Elektroenergetika segodnya i zavtra. – 2023. – С. 142-144.

5. Gromyko I. L., Mirosh D. V., Galushko V. N. Diagnostirovanie parametrov kachestva izolyatsii obmotok transformatorov pri ee uvlazhnenii. – 2022.

6. Vafin D. B., Shaikhiev I. M. Opyt zameny maslyanogo transformatora sukhim transformatorom v usloviyakh neftekhimicheskogo proizvodstva //Evraziiskoe Nauchnoe Ob"edinenie. – 2021. – №. 5-1. – С. 27-28.

7. Volchanina M. A., Kurmanov R. S., Kuznetsov A. A. Modelirovanie teplovykh kharakteristik silovogo transformatora pri peremennoi tokovoi nagruzke //Innovatsionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti. – 2022. – С. 170.

8. Sarsenov A. U. Modelirovanie elektrodinamicheskikh i teplovykh rezhimov silovykh transformatorov dlya otsenki effektivnosti nadezhnosti ekspluatatsii //Energetika i energosberezhenie: teoriya i praktika. – 2020. – С. 254-1-254-4.

9. Bapfutvabo L., Kubarev A.Yu., Usachev A.E., Boboev Sh.A., Garifullin M.Sh. Issledovanie kharakteristik poverkhnostnykh chastichnykh razryadov na granitse razdela vozdukh/steklo mezhdu metallichesкими elektrodami // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. 2024. Т. 16. № 3 (63). С. 35- 43.

10. Choudhary K. 3D modelling and finite element analysis of three phase transformer with integrated inductors in COMSOL Multiphysics. – 2020.

11. Khaleel D., Tang X., Abu-Zaher M. Advanced Simulation and Empirical Validation of High-Efficiency Induction Heating System Via COMSOL Multiphysics //2024 IEEE 10th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2024-ECCE Asia). – IEEE, 2024. – С. 2912-2917.

12. Basova A. V. et al. 2D&3D models for numerical calculation of electric fields in high-voltage transformers and reactors //Transformers Magazine. – 2024. – Т. 11. – №. 1. – S. 92-104
13. Yin Q. et al. Analysis and Treatment of a Partial Discharge Fault in a 220kV Transformer //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2024. – Т. 2800. – №. 1. – S. 012020..
14. Yanjing Z. et al. Optimal Design of Dry-Type Air-Core Shunt Reactor Structure Based on Response Surface Method //Frontier Academic Forum of Electrical Engineering. – Springer, Singapore, 2025. – S. 605-613.
15. Larin V. S., Zenenko A. S., Fortal'nov S. A. Perenapryazheniya na izolyatsii neutrali sukhikh transformatorov pri impul'snykh ispytaniyakh //Elektrichestvo. – 2024. – №. 2. – S. 11-17.
16. Gusev O. Yu., Gusev Yu. P., Yuzhanin A. E. Otsenka termicheskoi stoikosti transformatora napryazheniya pri broske toka namagnichivaniya, vyzvannogo odnofaznym замыканием на zemlyu //Elektrichestvo. – 2024. – №. 8. – S. 36-41.

Authors of the publication

Ruslan N. Balobanov– Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Venera M. Bulatova– Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Шифр научной специальности: 2.4.3. «Электроэнергетика».

Получено	10.01.2025 г.
Отредактировано	05.02.2025 г.
Принято	15.02.2025 г.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 536.7

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-1-88-102

ГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН СТАЦИОНАРНЫХ И ПУЛЬСИРУЮЩИХ ПОТОКОВ ВОЗДУХА В КРУГЛОЙ И ТРЕУГОЛЬНОЙ ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ ПРИ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Плотников Л.В.¹, Осипов Л.Е.¹, Григорьев Н.И.^{1,2}, Пономарев Д.А.², Плотников О.А.¹

¹ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

²ООО «Уральский дизель-моторный завод», г. Екатеринбург, Россия
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4481-3607>, leonplot@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования определяется тем, что нестационарные газодинамические явления в трубопроводах сложной конфигурации широко распространены в теплообменном и энергетическом оборудовании. Поэтому изучение уровня теплоотдачи пульсирующих потоков воздуха в круглой и треугольной трубах при разной степени турбулентности является актуальной и значимой задачей для развития науки и технологий. ЦЕЛЬ. Оценить влияние газодинамической нестационарности (пульсаций потока) на степень турбулентности и интенсивность теплоотдачи потоков воздуха в прямолинейных трубах с разными формами поперечного сечения. МЕТОДЫ. Исследования проводились на лабораторном стенде на основе метода тепловой анемометрии и автоматизированной системы сбора и обработки экспериментальных данных. В работе использовались прямолинейные круглая и треугольная трубы с одинаковыми площадями поперечного сечения. Пульсации потока от 3 до 15,8 Гц генерировались посредством вращающейся заслонки. Степень турбулентности пульсирующих потоков изменялась от 0,03 до 0,15 посредством установки стационарных плоских турбулизаторов. Рабочей средой был воздух с температурой $22 \pm 1^\circ\text{C}$ движущийся со скоростью от 5 до 75 м/с. РЕЗУЛЬТАТЫ. Получены экспериментальные данные о мгновенных значениях скорости и локального коэффициента теплоотдачи стационарных и пульсирующих потоков воздуха с разным уровнем турбулизации в прямолинейных трубах с разными формами поперечного сечения. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Установлено, что наличие газодинамической нестационарности приводит к увеличению степени турбулентности на 47-72 % в круглой трубе и на 36-86 % в треугольной трубе. Наличие газодинамической нестационарности вызывает интенсификацию теплоотдачи в круглой трубе на 26-35,5 % и на 24-36 % в треугольной трубе. Показано, что существенное увеличение степени турбулентности приводит к росту коэффициента теплоотдачи пульсирующих потоков в круглой трубе на 11-16 % и, наоборот, снижению коэффициента теплоотдачи на 7-24 % в треугольной трубе. Полученные результаты могут найти применение при проектировании теплообменных аппаратов и систем газообмена в энергетических машинах, а также при создании устройств и аппаратов импульсного действия.

Ключевые слова: прямолинейная труба; круглое и треугольное поперечные сечения; стационарный и пульсирующий потоки; местная скорость; локальная и осредненная теплоотдача; степень турбулентности; частота пульсаций потока.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке РНФ в рамках научного проекта 23-29-00022.

Для цитирования: Плотников Л.В., Осипов Л.Е., Григорьев Н.И., Пономарев Д.А., Плотников О.А. Газодинамика и теплообмен стационарных и пульсирующих потоков воздуха в круглой и треугольной прямолинейных трубопроводах при разной степени

GAS DYNAMICS AND HEAT TRANSFER OF STATIONARY AND PULSATING AIR FLOWS IN ROUND AND TRIANGULAR STRAIGHT PIPELINES AT DIFFERENT TURBULENCE DEGREES

Plotnikov L.V.¹, Osipov L.E.¹, Grigoriev N.I.^{1,2}, Ponomarev D.A.², Plotnikov O.A.¹

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russia

²Ural Diesel-Motor Plant LLC, Ekaterinburg, Russia
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4481-3607>, leonplot@mail.ru

Abstract: RELEVANCE of the study is determined by the fact that non-stationary gas-dynamic phenomena in pipelines of complex configuration are widespread in heat exchange and power equipment. Therefore, the study of the level of heat transfer of pulsating air flows in round and triangular pipes with different degrees of turbulence is an urgent and significant task for the development of science and technology. THE PURPOSE. The influence of gas-dynamic non-stationarity (flow pulsations) on the degree of turbulence and the intensity of heat transfer of air flows in straight pipes with different cross-sectional shapes had to be assessed. METHODS. The studies were conducted on a laboratory bench based on the thermal anemometry method and an automated system for collecting and processing experimental data. Rectilinear round and triangular pipes with identical cross-sectional areas were used in the work. Flow pulsations from 3 to 15.8 Hz were generated by means of a rotating damper. The degree of turbulence of pulsating flows varied from 0.03 to 0.15 by installing stationary flat turbulators. The working environment was air with a temperature of 22-24 °C moving at a speed of 5 to 75 m/s. RESULTS. Experimental data on instantaneous values of velocity and local heat transfer coefficient of stationary and pulsating air flows with different levels of turbulence in straight pipes with different cross-sectional shapes were obtained. CONCLUSION. It has been established that the presence of gas-dynamic non-stationarity leads to an increase in the degree of turbulence by 47-72% in a round pipe and by 36-86% in a triangular pipe. The presence of gas-dynamic non-stationarity causes an intensification of heat transfer in a round pipe by 26-35.5% and by 24-36% in a triangular pipe. It has been shown that a significant increase in the degree of turbulence leads to an increase in the heat transfer coefficient of pulsating flows in a round pipe by 11-16% and, conversely, a decrease in the heat transfer coefficient by 7-24% in a triangular pipe. The obtained results can be used in the design of heat exchangers and gas exchange systems in power machines, as well as in the creation of pulsed action devices and apparatus.

Keywords: straight pipe; circular and triangular cross-sections; steady and pulsating flows; local velocity; local and average heat transfer; degree of turbulence; flow pulsation frequency.

Acknowledgments: The work has been supported by the Russian Science Foundation (grant No 23–29–00022).

For citation: Plotnikov L.V., Osipov L.E., Grigoriev N.I., Ponomarev D.A., Plotnikov O.A. Gas dynamics and heat transfer of stationary and pulsating air flows in round and triangular straight pipelines at different turbulence degrees. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (1): 88-102. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-88-102.

Введение (Introduction)

Рабочие тела в виде пульсирующих потоков жидкости и газа в трубах различных конфигураций применяются во многих отраслях промышленности и техники (например, пульсирующие тепловые трубы [1], солнечная энергетика [2] и поршневые двигатели внутреннего сгорания [3]). В большинстве случаев эффективность конечного продукта (двигателя, теплообменного аппарата, энергетической установки и др.) зависит от газодинамического и теплообменного совершенства процессов рабочего тела в системах с трубами разных конфигураций. В подобных системах термогазодинамику течения

определяет большое количество факторов: (1) характеристики пульсаций потока (частота, амплитуда, вид); (2) степень турбулентности потока и (3) геометрическая конфигурация трубопровода. Поэтому получение данных о газодинамике и теплообмене пульсирующих потоков газа в прямолинейных трубах с разными формами поперечного сечения для разных условий турбулентности остается актуальной и важной задачей для развития фундаментальной и прикладной науки, а также для повышения эффективности энергетических технологий. Краткий обзор современных результатов исследований по данной тематике представлен ниже.

Вопрос влияния газодинамической нестационарности (пульсаций) потока газа на интенсивность теплоотдачи в трубопроводных системах остается в центре внимания многих исследователей [4-6]. Nishandar S.V. с коллегами провели подробное изучение особенностей газодинамика пульсирующих потоков в трубе для уточнения физического механизма изменения уровня теплообмена [4]. Авторы выделили несколько важных факторов, которые имеют определяющее влияние на теплообмен: число Рейнольдса, длина и диаметр трубы, частота и амплитуда пульсации потока. Выявлено, что высокочастотные пульсации скорости потока повышают локальное число Нуссельта в трубе. Naygullin A. с соавторами исследовали влияние пульсаций потока на уровень теплообмена в пучке труб теплообменных аппаратов различных конструкций [5]. Установлено, что в данном случае интенсификация теплообмена усиливается с ростом амплитуды и частоты пульсаций потока и уменьшается с ростом числа Рейнольдса. Зафиксировано увеличение коэффициента теплоотдачи в 1,25-1,6 раз по сравнению со стационарным течением. van Buren S. и др. изучали пульсирующие потоки в трубе с реверсированием потока [6]. Показано, что существует увеличение коэффициента теплоотдачи до 60% по сравнению со стационарным движением среды в моменты реверсирования потока. При этом, увеличение осредненного коэффициента теплоотдачи за полный цикл рассматриваемой пульсации не столь существенно. Nakamura H. с коллегами исследовали по отдельности влияние ускорения и замедления потока воздуха на интенсивность теплоотдачи в трубе [7].

Также существуют прикладные исследования по изучению влияния пульсаций потока газа на уровень теплообмена в выпускных системах поршневых двигателей [8, 9]. Так, Simonetti M. и др. исследовали теплоотдачу выпускных газов двигателя, пульсирующих с частотами от 10 до 95 Гц [8]. Авторы определили, что пульсации потока улучшили теплообмен в системе во всем диапазоне частот. При этом, ключевым фактором повышения коэффициента теплоотдачи являлась величина относительной амплитуды скорости потока газа. В свою очередь, Kato Y. с коллегами обнаружили, что повышенная интенсивность теплоотдачи выпускных газов на частотах 25-35 Гц могла быть связана с повышенной турбулентностью потока, вызванной пульсациями потока в выпускной системе [9].

Отдельным направлением исследований пульсирующих потоков в различных газодинамических системах состоит в изучении влияния турбулизации течения на интенсивность теплообмена [10-12]. Один из самых известных и эффективных способов улучшения теплообмена потока воздуха в каналах является создание различного рода лунок и/или канавок на внутренней поверхности (сферические лунки, плоский прямоугольник, квадратная канавка, прямоугольная канавка и т.д.). Например, это может вызывать турбулизацию течения и соответствующую интенсификацию теплообмена вплоть до 2 раз по сравнению с гладкими поверхностями [10]. De Maio M. с коллегами обнаружил, что существенное увеличение шероховатости трубы также вызывает рост степени турбулентности потока и интенсификацию теплообмена на 4-13 % по сравнению с гладкой трубой [11]. Также существуют другие способы турбулизации потока жидкости и газа с целью интенсификации теплообмена, например, путем установки аэродинамического спойлера или создания специального оребрения на поверхности канала [12]. Это может приводить к росту коэффициента теплоотдачи на 170 % по сравнению с гладкой поверхностью.

Также известно, что форма поперечного сечения трубопровода может оказывать существенное влияние на газодинамические условия теплообмена стационарных и пульсирующих потоков газа [13, 14]. Так, Nikitin N.V. с коллегами подробно исследовал формирование и развитие вторичных течений в пульсирующем потоке в квадратной трубе [13]. Авторы описали физический механизм вихревых токов в углах квадрата и предложили математическую модель для их прогнозирования. Kumar R. и др. сделали обзор исследований об особенностях газодинамики и теплообмена в треугольных трубах [14]. Показано, что в треугольных трубах также формируются сильные вторичные течения,

которые существенно модифицируют газодинамические характеристики потока и вызывают изменение уровня теплообмена.

Многие исследователи уделяют внимание сравнению интенсивности теплоотдачи стационарных и пульсирующих потоков в квадратных и треугольных каналах [14-17]. Так, Guo G. с соавторами установили, что имеет место незначительное снижение коэффициента теплоотдачи в квадратной при пульсирующем движении среды по сравнению со стационарным потоком [15]. Аналогичные данные были получены Nikitin N.: газодинамическая нестационарность в квадратной трубе вызывала подавление интенсивности теплоотдачи вплоть до 15 % [16]. Pirozzoli S. и др. сравнили уровень теплообмена стационарных потоков в круглой и квадратной трубах [17]. Показано, что изменение формы поперечного сечения оказывает слабое влияние на интенсивность теплоотдачи. При этом, Kumar R. с коллегами обнаружил незначительную интенсификацию теплообмена в треугольной трубе по сравнению с круглой [14]. Соответственно, можно заключить, что газодинамика и теплообмен потоков в трубах с разными формами поперечного сечения изучена недостаточно подробно: разные конфигурационные и режимные условия в постановке задачи исследования приводят к противоположным эффектам.

Также существуют разработки и исследования по применению специфических конструкций труб для интенсификации теплообмена [18, 19]. Так, Zhang L. с коллегами исследовали особенности газодинамики и теплообмена в волновой и дуговой трубках [18]. Результаты показали заметную интенсификацию теплообмена практически на всех исследуемых режимах (для всех чисел Рейнольдса). Kurtulmuş N. и Sahin B. получили аналогичные результаты для синусоидальной трубы [19]. Необходимо отметить, что исследования проводились для стационарного и пульсирующего потока. При этом, газодинамическая нестационарность приводила к дополнительному росту коэффициента теплоотдачи.

Соответственно, изучение влияния конфигурационных (различные формы поперечного сечения каналов) и режимных (стационарные и пульсирующие потоки) факторов на газодинамику и теплообмен потоков в трубопроводах остается востребованной и важной задачей в развитии науки и техники.

Таким образом, основные задачи данного исследования состояли в следующем:

- получить экспериментальные данные о мгновенных значениях скорости и локального коэффициента теплоотдачи стационарных и пульсирующих потоков воздуха с разным уровнем турбулизации в прямолинейных трубах с разными формами поперечного сечения;
- оценить влияние газодинамической нестационарности на степень турбулентности потоков воздуха в круглой и треугольной прямолинейных трубах;
- установить влияние газодинамической нестационарности на интенсивность теплоотдачи потоков воздуха в круглой и треугольной трубах;
- выявить влияние частоты пульсаций потока воздуха на степень турбулентности и коэффициент теплоотдачи потоков воздуха в трубах с разными формами поперечного сечения.

Научная значимость исследования состоит в том, что впервые получены сведения о воздействии газодинамической нестационарности на степень турбулентности и интенсивность теплоотдачи потока воздуха в треугольной прямолинейной трубе, а также проведен сравнительный анализ влияния поперечного профилирования трубопровода на газодинамику и теплообмен в рассматриваемой системе.

Практическая значимость исследования заключается в получении теплофизических закономерностей необходимых для проектирования перспективных теплообменных аппаратов и оригинальных систем газообмена в энергетических машинах, а также для создания устройств и аппаратов импульсного (периодического) действия.

Материалы и методы (Materials and methods)

Исследование нестационарной газодинамики и теплообмена потоков в прямолинейных трубах осуществлялось посредством экспериментальных подходов на основе метода тепловой анемометрии. Для этих целей была разработана лабораторная установка, схема которой показана на рисунке 1.

Лабораторная установка состоит из следующих основных элементов: (1) вакуумный насос для создания движения воздуха в газодинамической системе; (2) прямолинейные трубопроводы с поперечными сечениями в форме круга и треугольника; (3) статические плоские турбулизаторы потока воздуха; (4) вращающаяся заслонка для создания пульсаций

потока воздуха; (5) измерительная система на базе термоанемометра постоянной температуры.

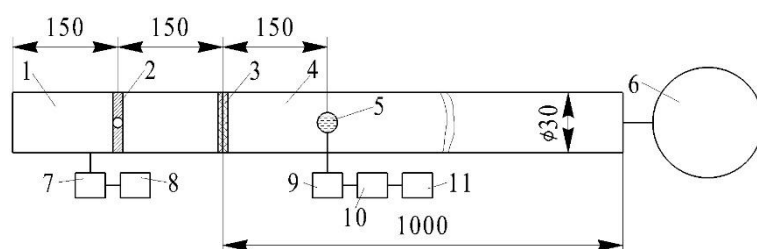


Рис. 1. Блок-схема экспериментального стенда: 1 – входной участок; 2 – вращающаяся заслонка; 3 – пластинчатый турбулизатор; 4 – исследуемая труба круглого поперечного сечения; 5 – контрольное сечение с датчиками; 6 – откачивающий насос; 7 – электропривод заслонки; 8 – система управления частотой вращения заслонкой; 9 – термоанемометр; 10 – аналого-цифровой преобразователь; 11 – персональный компьютер

Fig. 1. Block diagram of the experimental stand: 1 – inlet section; 2 – rotating flap; 3 – plate turbulator; 4 – pipe of round cross-section under study; 5 – control section with sensors; 6 – pumping pump; 7 – electric flap drive; 8 – flap speed control system; 9 – thermoanemometer; 10 – analog-to-digital converter; 11 – personal computer

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

Пульсации потока в газодинамической системе создавались посредством заслонки (рис. 2а), частота вращения которой могла изменяться посредством регулятора напряжения. Таким образом генерировались пульсации потока воздуха с частотой f от 3 до 16,6 Гц. Подобные пульсирующие потоки характерны для различных устройств периодического действия (например, поршневых машин) и для импульсных аппаратов различного назначения.

Стационарные плоские турбулизаторы использовались для изменения степени турбулентности стационарных и пульсирующих потоков в прямолинейных трубах (рис. 2б). Применялось несколько турбулизаторов с разным количеством отверстий и разным диаметром отверстий. Таким образом степень турбулентности потока Tu изменялась от 0,03-0,04 (поток без турбулизатора) до 0,12 (максимальное среднее значение Tu).

В исследовании использовались две конфигурации прямолинейных трубопроводов. Базовая труба имела круглое поперечное сечение с внутренним диаметром 30 мм. Альтернативная труба имела поперечное сечение в форме равностороннего треугольника со стороной равной 39 мм. Геометрия треугольной трубы была выбрана исходя из равенства площади поперечного сечения обеих труб. Длина трубопроводов составляла 1 м в обоих случаях. Научная идея исследования треугольной трубы основывается на известных данных, что в каналах с поперечным профилированием образуются сильные вторичные течения, которые заметно влияют на газодинамические и теплообменные характеристики потоков [20, 21].

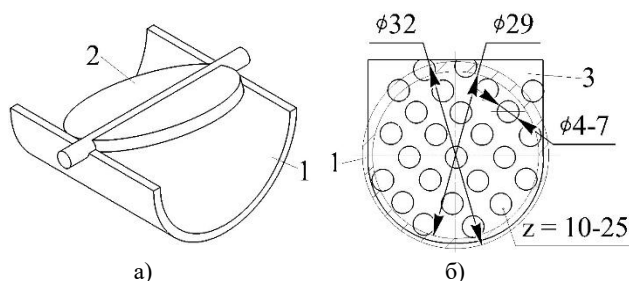


Рис. 2. Общий вид вращающейся заслонки (а) и геометрические размеры плоского турбулизатора (б): 1 – трубопровод; 2 – заслонка; 3 – плоский турбулизатор

Fig. 2. General view of the rotating damper (a) and geometric dimensions of the flat turbulizer (b): 1 – pipeline; 2 – damper; 3 – flat turbulizer

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

Рабочей средой в опытах был воздух с температурой $22 \pm 1^\circ\text{C}$ движущийся со скоростью от 5 м/с до 75 м/с ($10\,000 < Re < 150\,000$), т.е. режим течения являлся развитым

турбулентным. Опыты проводились при атмосферном давлении $98,0 \pm 0,2$ кПа (измеренным посредством барометр-анероид типа БАММ-1 и указанное с учетом погрешности прибора).

Следующие параметры измерялись в опытах: (1) мгновенные значения скорости потока воздуха w_x (посредством термоанемометра постоянной температуры с быстродействием не более 3 мс); (2) мгновенные значения локального коэффициента теплоотдачи α_x (посредством термоанемометра постоянной температуры с аналогичным быстродействием); (3) температура потока (посредством термопар); (4) частота вращения заслонки (посредством индуктивного датчика); (5) атмосферное давление (посредством барометра-анероида).

Метод тепловой анемометрии был основным исследовательским методом в данной работе. Изготавливались специальные датчики с нитевым чувствительным элементом для термоанемометра постоянной температуры для измерения w_x и α_x [22, 23]. Нить имела диаметр 5 мкм и длину около 5 мм. Нить размещалась на стойках примерно в центре трубы на для определения w_x . Для определения α_x нить монтировалась на подложке и располагалась заподлицо с внутренней поверхностью трубы. Применялся термоанемометр постоянной температуры Ирвис (Россия), датчики изготавливались самостоятельно. Более подробные сведения о датчиках и способе их установки в трубопроводах разных конфигураций можно найти в статье [24]. В данной статье представлены данные, полученные с помощью датчиков, расположенных на расстоянии 150 мм от турбулизатора (см. также рис. 1).

Сигналы со всех датчиков поступали в аналого-цифровой преобразователь LCard (Россия) в режиме реального времени. После чего оцифрованные сигналы передавались в специализированное программное обеспечение LGraph2 (Россия) для хранения и обработки.

Относительная неопределенность определения w_x составляла 5,3 %; относительная неопределенность определения α_x равнялась 10,9 %; относительная неопределенность измерения температуры потока была 1,0 %.

Таким образом, была разработана газодинамическая система с автоматизированной измерительной базой, которая позволяла исследовать газодинамику и теплообмен стационарных и пульсирующих потоков воздуха с разными частотами пульсаций и разной степенью турбулентности.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Первичные данные об изменении мгновенных значений скорости w_x и локального коэффициента теплоотдачи α_x во времени при течении пульсирующего потока воздуха в круглой и треугольной трубах без турбулизатора показаны на рисунках 3 и 4.

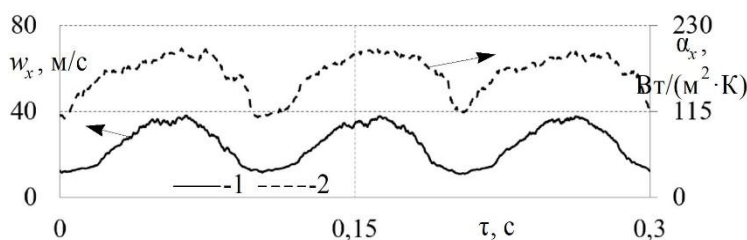


Рис. 3. Зависимости местной скорости потока воздуха w_x и локального коэффициента теплоотдачи α_x от времени τ в круглой трубе без турбулизатора ($Tu \approx 0,03$) при следующих условиях: $w = 24,8$ м/с, $f = 10,6$ Гц

Fig. 3. Dependences of local air flow velocity w_x and local heat transfer coefficient α_x on time τ in a circular tube without turbulator ($Tu \approx 0,03$) under the following conditions: $w = 24.8$ m/s, $f = 10.6$ Hz

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

Следующие выводы были сделаны на основе сравнения данных на рисунках 3 и 4:

- имеют место ярко выраженные пульсации потока (с соответствующими максимумами и минимумами w_x и α_x), обусловленные перекрытием трубы заслонкой для обоих случаев;

- при течении в круглой трубе на зависимостях $w_x = f(\tau)$ и $\alpha_x = f(\tau)$ практически отсутствуют флуктуации скорости w_x и локального коэффициента теплоотдачи α_x , тогда как при использовании треугольной трубы имеют место заметные флуктуации w_x и α_x потока; их формирование может быть связано с вторичными вихревыми течениями в углах треугольного профиля;

- максимальные значения α_x в треугольной трубе визуально меньше на 10-15% по сравнению с круглой трубой в данных условиях эксперимента.

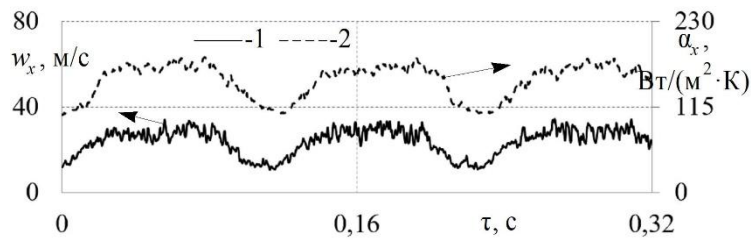


Рис. 4. Зависимости местной скорости потока воздуха w_x и локального коэффициента теплоотдачи α_x от времени τ в треугольной трубе без турбулизатора ($Tu \approx 0,05$) при следующих условиях: $w = 23,8$ м/с, $f = 9,2$ Гц

Fig. 4. Dependences of local air flow velocity w_x and local heat transfer coefficient α_x on time τ in a triangular tube without turbulator ($Tu \approx 0.05$) under the following conditions: $w = 23.8$ m/s, $f = 9.2$ Hz

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

Первичные данные об изменении мгновенных значений скорости w_x и локального коэффициента теплоотдачи α_x во времени при течении пульсирующего потока воздуха в круглой и треугольной трубах с турбулизатором показаны на рисунках 5 и 6.

Из рисунка 5 видно, что повышение степени турбулентности потока вызвало существенную деформацию зависимостей $w_x = f(\tau)$ и $\alpha_x = f(\tau)$ в круглой трубе. Амплитуда колебания потока воздуха соизмерима с амплитудой основных пульсаций. На функции $\alpha_x = f(\tau)$ визуально сложно идентифицировать пульсации локального коэффициента теплоотдачи, вызванные вращающейся заслонкой.

В свою очередь, пульсирующий поток воздуха в треугольной трубе является более стойким к повышению степени турбулентности (рис. 6). Флуктуации местной скорости потока w_x имеют существенно меньшую амплитуду в треугольной трубе по сравнению с круглой. Функция $\alpha_x = f(\tau)$ является более выраженной (четкой); существует возможность легко идентифицировать пульсации локального коэффициента теплоотдачи вследствие вращения заслонки в трубопроводе. Соответственно, можно предположить, что вторичные вихревые структуры, образующиеся в треугольной трубе, придают жесткости потоку, препятствуя его деформации под воздействием внешних возмущений.

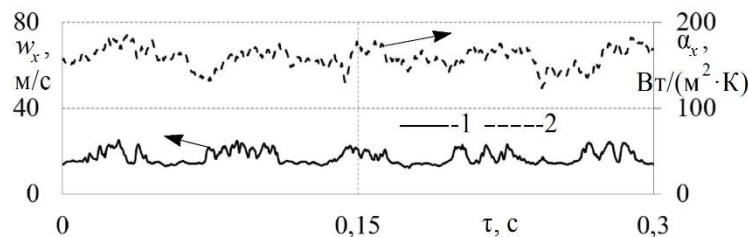


Рис. 5. Зависимости местной скорости потока воздуха w_x и локального коэффициента теплоотдачи α_x от времени τ в круглой трубе с турбулизатором ($Tu \approx 0,12$) при следующих условиях: $w = 17,2$ м/с, $f = 16,6$ Гц

Fig. 5. Dependences of local air flow velocity w_x and local heat transfer coefficient α_x on time τ in a circular tube with a turbulator ($Tu \approx 0.12$) under the following conditions: $w = 17.2$ m/s, $f = 16.6$ Hz

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

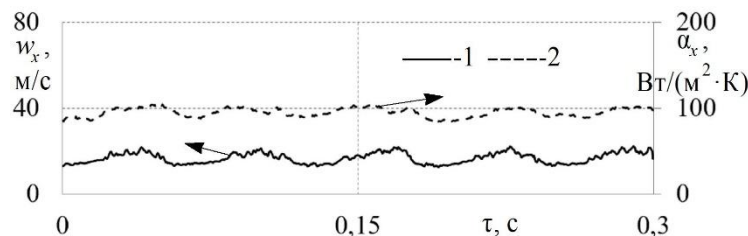


Рис. 6. Зависимости местной скорости потока воздуха w_x и локального коэффициента теплоотдачи α_x от времени τ в треугольной трубе с турбулизатором ($Tu \approx 0,10$) при следующих условиях: $w = 17,5$ м/с, $f = 16,6$ Гц

Fig. 6. Dependences of local air flow velocity w_x and local heat transfer coefficient α_x on time τ in a triangular tube with a turbulator ($Tu \approx 0.10$) under the following conditions: $w = 17.5$ m/s, $f = 16.6$ Hz

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

Для количественной оценки величины пульсационной составляющей скорости воздушного потока в газодинамической системе рассчитывалась степень турбулентности Tu для круглой и треугольной труб в свободном потоке, т. е. без применения турбулизатора (рис. 7-8). Анализ рисунков 7 и 8 позволяет проследить влияние газодинамической нестационарности и геометрической формы трубопроводов на степень турбулентности в прямолинейных трубах. Tu определялась как отношение среднеквадратичной пульсационной составляющей скорости к средней скорости исследуемого потока; методика расчета Tu для пульсирующих поток подробно описана в статье [25].

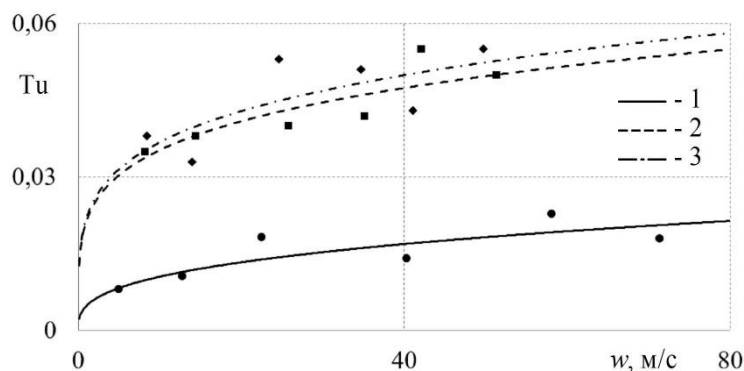


Рис. 7. Зависимости степени турбулентности Tu в круглой прямолинейной трубе без турбулизатора от средней скорости потока w для разных условий: 1 – стационарное течение; 2 – пульсирующий поток с $f = 4,6$ Гц; 3 – пульсирующий поток с $f = 15,3$ Гц

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

Из рисунка 7 видно, что имеется тенденция увеличения значений Tu с ростом средней скорости потока воздуха в круглой трубе, что характерно для стационарного и пульсирующего течений. При этом, газодинамическая нестационарность (пульсации потока) вызывают существенный рост степени турбулентности Tu почти в 2 раза по сравнению со стационарным течением. Эти отличия характерны для всех исследуемых скоростей потока воздуха. При этом увеличение частоты пульсаций f фактически не оказывает влияния на Tu (различия находятся в пределах неопределенности эксперимента).

Иные закономерности изменения степени турбулентности потока имеют место в треугольной трубе (рис. 8).

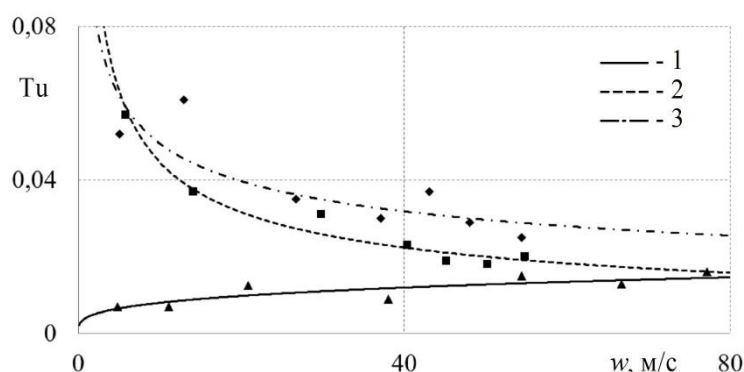


Рис. 8. Зависимости степени турбулентности Tu в треугольной прямолинейной трубе без турбулизатора от средней скорости потока w для разных условий: 1 – стационарное течение; 2 – пульсирующий поток с $f = 3,0$ Гц; 3 – пульсирующий поток с $f = 15,8$ Гц

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

Значения Tu увеличиваются с ростом скорости потока для стационарного течения воздуха в треугольной трубе. Однако, наблюдается противоположная тенденция для пульсирующих потоков: значения Tu уменьшаются с ростом скорости в треугольной трубе.

При этом значения Tu в 1,36-2,2 раза выше для пульсирующих потоков по сравнению со стационарным движением воздуха при скоростях $w < 40$ м/с. Для $w > 40$ м/с значения Tu являются приблизительно одинаковыми (в пределах неопределенности эксперимента) для стационарного и пульсирующего потоков. Частота пульсаций f потока также оказывает слабое влияние на степени турбулентности. Обнаруженные особенности изменения Tu в треугольной трубе могут быть объяснены продольными вихревыми структурами, образующимися в углах канала. Вероятно, они стабилизируют течение и препятствуют газодинамической деформации под действием внешних факторов.

Существенное изменение газодинамических условий в треугольной трубе должно привести к модификации теплообменных характеристик стационарных и пульсирующих потоков воздуха. Поэтому дополнительно рассчитывался осредненный коэффициент теплоотдачи α в обеих трубах для разных граничных условий. Коэффициент α определялся как математическое ожидание функции $\alpha_x = f(\tau)$ за один период пульсации.

Проследить влияние газодинамической нестационарности потока и формы поперечного сечения трубопровода на уровень теплоотдачи в прямолинейных трубах можно на основе рисунков 9 и 10.

Из рисунка 9 видно, что газодинамическая нестационарность вызывает интенсификацию теплоотдачи в круглой прямолинейной трубе на 22-30%. При этом увеличение частоты пульсаций потока f не вызывает заметного дальнейшего роста коэффициента теплоотдачи (увеличение α составляет 4-5,5 % при росте f с 4,6 Гц до 15,3 Гц, что находится в пределах неопределенности эксперимента). Подобные данные о влиянии пульсаций потока воздуха на уровень теплообмена в различных газодинамических системах можно найти у других авторов [26, 27]. Имеется схожесть научных результатов, что газодинамическая нестационарность вызывает интенсификацию теплообмена в пределах 20-40%. Также существуют данные других авторов о том, что увеличение значений степени турбулентности вызывает рост коэффициента теплоотдачи [28]. Обнаруженная интенсификация теплообмена в пульсирующих течениях может быть связана с крупно- и мелкомасштабными колебаниями в потоке, и соответствующей перестройкой и ослаблением пограничного слоя, что способствует теплопереносу.

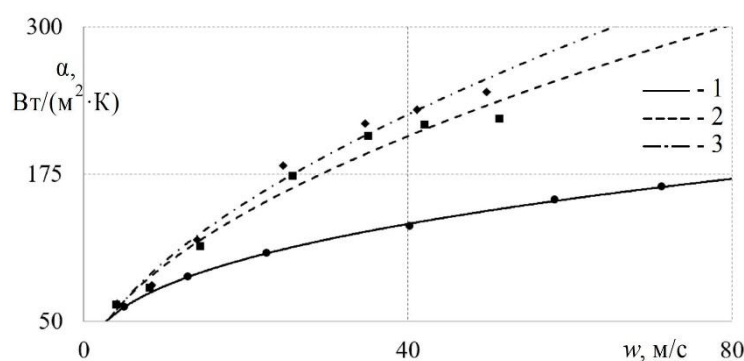


Рис. 9. Зависимости осредненного коэффициента теплоотдачи α в круглой прямолинейной трубе без турбулизатора от скорости потока воздуха w для разных условий: 1 – стационарное течение; 2 – пульсирующий поток с $f = 4,6$ Гц; 3 – пульсирующий поток с $f = 15,3$ Гц

Fig. 9. Dependences of the averaged heat transfer coefficient α in a circular rectilinear pipe without turbulizer on the air flow velocity w for different conditions: 1 – stationary flow; 2 – pulsating flow with $f = 4.6$ Hz; 3 – pulsating flow with $f = 15.3$ Hz

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

Аналогичное влияние оказывает газодинамическая нестационарность на уровень теплообмена потоков в треугольной трубе: имеет место интенсификация коэффициента теплоотдачи на 24-36% по сравнению со стационарным течением (рис. 10). Также увеличение частоты пульсаций с 3 Гц до 15,8 Гц фактически не оказывает влияние на интенсивность теплоотдачи (наблюдается незначительное снижение α на 2-11%, что находится в пределах неопределенности эксперимента). Соответственно, можно констатировать, что газодинамическая нестационарность оказывает схожее влияние на уровень теплообмена потока воздуха в круглой и треугольной трубах.

Следует отметить, что значения коэффициента теплоотдачи пульсирующих потоков в треугольной трубе меньше на 6,5-13,5% по сравнению с таковыми в круглой трубе. Это можно объяснить с помощью ранее обнаруженного эффекта, заключающегося в

стабилизации пульсирующего потока в треугольной трубе и пониженными значениями степени турбулентности.

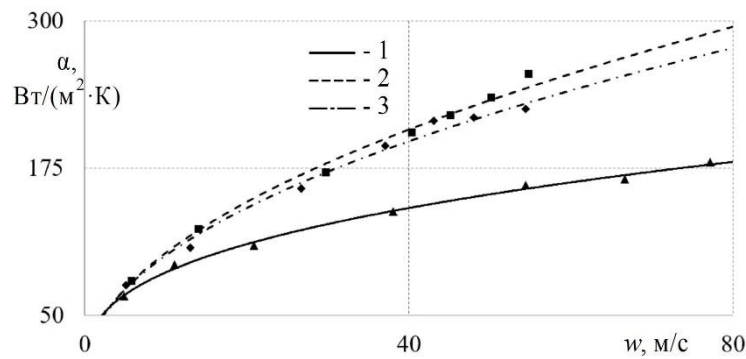


Рис. 10. Зависимости осредненного коэффициента теплоотдачи α в треугольной прямолинейной трубе без турбулизатора от скорости потока воздуха w для разных условий: 1 – стационарное течение; 2 – пульсирующий поток с $f = 3,0$ Гц; 3 – пульсирующий поток с $f = 15,8$ Гц

Fig. 10. Dependences of the averaged heat transfer coefficient α in a triangular rectilinear tube without turbulator on the air flow velocity w for different conditions: 1 – stationary flow; 2 – pulsating flow with $f = 3.0$ Hz; 3 – pulsating flow with $f = 15.8$ Hz

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

Оценить влияние турбулизации пульсирующего потока на интенсивность теплоотдачи в трубах с разными формами поперечного сечения можно на основе рисунков 11 и 12.

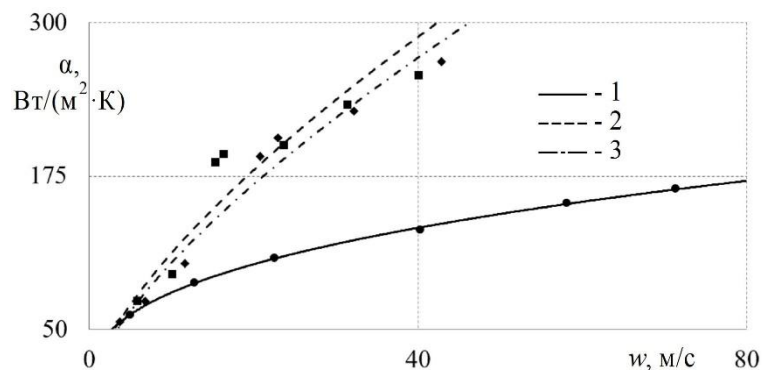


Рис. 11. Зависимости осредненного коэффициента теплоотдачи α в круглой прямолинейной трубе от скорости потока воздуха w для разных условий: 1 – стационарное течение с $Tu = 0,04$; 2 – пульсирующий поток с $f = 10,6$ Гц и $Tu = 0,08$; 3 – пульсирующий поток с $f = 14$ Гц и $Tu = 0,12$

Fig. 11. Dependences of the averaged heat transfer coefficient α in a circular rectilinear tube on the air flow velocity w for different conditions: 1 – stationary flow with $Tu = 0.04$; 2 – pulsating flow with $f = 10.6$ Hz and $Tu = 0.08$; 3 – pulsating flow with $f = 14$ Hz and $Tu = 0.12$

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

Сравнение зависимостей на рисунке 9 (данные без турбулизатора) и рисунке 11 (данные с турбулизацией потока) показывает, что:

- увеличение Tu с 0,04 до 0,08 приводит к росту коэффициента теплоотдачи пульсирующих потоков в круглой трубе на 11-16%, что хорошо согласуется с [38];
- дальнейшее повышение степени турбулентности пульсирующего потока вызывает дополнительное небольшое увеличение α в пределах 5-8%;
- соответственно, есть основания констатировать, что турбулизация пульсирующего потока в круглой трубе интенсифицирует теплоотдачу;
- частота пульсаций имеет слабое влияние на уровень теплоотдачи пульсирующих потоков в круглой трубе.

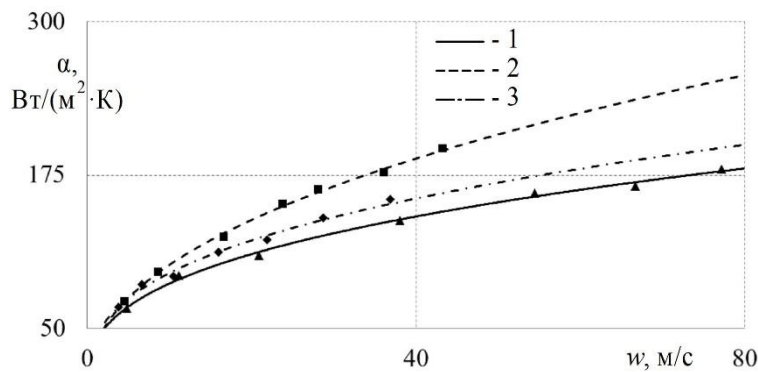


Рис. 12. Зависимости осредненного коэффициента теплоотдачи α в треугольной прямолинейной трубе от скорости потока воздуха w для разных условий: 1 – стационарное течение с $Tu = 0,03$; 2 – пульсирующий поток с $f = 9,2$ Гц и $Tu = 0,08$; 3 – пульсирующий поток с $f = 9,2$ Гц и $Tu = 0,15$

Fig. 12. Dependences of the averaged heat transfer coefficient α in a triangular rectilinear tube on the air flow velocity w for different conditions: 1 – stationary flow with $Tu = 0.03$; 2 – pulsating flow with $f = 9.2$ Hz and $Tu = 0.08$; 3 – pulsating flow with $f = 9.2$ Hz and $Tu = 0.15$

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

Сопоставление закономерностей на рисунке 10 (данные без турбулизации потока) и рисунке 12 (данные с турбулизатором в трубе) показывает, что:

- повышение степени турбулентности пульсирующего потока (с 0,04 до 0,08) в треугольной трубе приводит к подавлению теплоотдачи до 24%;
- рост Tu пульсирующего потока с 0,04 до 0,15 в треугольной трубе вызывает снижение коэффициента теплоотдачи до 10,6% (что находится в пределах неопределенности эксперимента);
- соответственно, можно заключить, что турбулизация пульсирующего потока в треугольной трубе подавляет теплоотдачу; обнаруженный эффект требует проведения дополнительных исследований для уточнения физического механизма.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что интенсивность теплоотдачи потоков воздуха в трубах с разными поперечными сечениями имеет заметные отличия. Это необходимо учитывать при проектировании газодинамических систем для теплообменного оборудования, тепловых двигателей и энергетических установок.

Таким образом, были получены экспериментальные данные о влиянии геометрии прямолинейной трубы, пульсаций и турбулизации потока воздуха на интенсивность теплоотдачи. Полученные данные расширяют базу знаний о газодинамике и теплообмене стационарных и пульсирующих течений в трубопроводах для разных начальных условий. Обнаруженные научные результаты могут найти применение при проектировании теплообменных аппаратов и систем газообмена в энергетике, а также при создании машин и аппаратов циклического (импульсного) действия.

Выводы (Conclusions)

Анализ и обобщение полученных данных позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Был разработан лабораторный стенд и создана измерительная система с необходимым быстродействием для исследования газодинамики и теплообмена стационарных и пульсирующих потоков в прямолинейных трубах с разными формами поперечного сечения.
2. Установлено, что газодинамическая нестационарность (наличие пульсаций потока в сравнении со стационарным течением) приводит к увеличению степени турбулентности Tu на 47-72% в круглой прямолинейной трубе и на 36-86% в треугольной трубе.
3. Выявлено, что газодинамическая нестационарность (пульсации потока в диапазоне от 4,6 до 15,3 Гц) вызывает интенсификацию теплоотдачи в круглой прямолинейной трубе на 26-35,5%.
4. Показано, что газодинамическая нестационарность (пульсации потока в диапазоне от 3,0 до 15,8 Гц) приводит к росту коэффициента теплоотдачи в треугольной трубе на 24-36%.
5. Установлено, что увеличение Tu с 0,04 до 0,12 приводит к росту коэффициента теплоотдачи пульсирующих потоков в круглой трубе на 11-16%.
6. Выявлено, что повышение Tu (с 0,04 до 0,15) для пульсирующего потока в треугольной трубе приводит к подавлению теплоотдачи на 7-24%.

7. Полученные результаты подтверждают существенное влияние пульсаций потока, степени турбулентности и формы поперечного сечения трубопроводов на газодинамические и теплообменные характеристики потоков газа в прямолинейных трубах.

Полученные результаты могут быть полезны для проектирования энергетического и теплообменного оборудования и для уточнения математических моделей для прогнозирования газодинамики и теплообмена стационарных и пульсирующих потоков газа.

Литература

1. Yang K.-S., Jiang M.-Y., Tseng C.-Y., Wu S.-K., Shyu J.-C. Experimental investigation on the thermal performance of pulsating heat pipe heat exchangers // *Energies*. 2020. Vol. 13(1). Article number 269.
2. Matouq J., Al-Waked R., Al-Rashdan M., Mustafa D.B., Nasif M.S. Computational Fluid Dynamics Analysis of Slip Flow and Heat Transfer at the Entrance Region of a Circular Pipe // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2024. Vol. 14(15). Article number 6528.
3. Winkler N. Effect of pressure oscillations on in-cylinder heat transfer - Through large eddy simulation // *International Journal of Engine Research*. 2015. Vol. 16(6). P. 705-715.
4. Nishandar S.V., Pise A.T., Bagade P.M., Gaikwad M.U., Singh A. Computational modelling and analysis of heat transfer enhancement in straight circular pipe with pulsating flow // *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. 2024.
5. Hayrullin A., Haibullina A., Sinyavin A., Ilyin V. Experimental study of the in-line tube bundle thermal performance in pulsating flow // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2024. Vol. 232. Article number 125916.
6. Van Buren S., Miranda A.C., Polifke W. Large eddy simulation of enhanced heat transfer in pulsatile turbulent channel flow // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 144. Article number 118585.
7. Nakamura H., Saito R., Yamada S. Delay in response of turbulent heat transfer against acceleration or deceleration of flow in a pipe // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2020. Vol. 85. Article number 108661.
8. Simonetti M., Caillol C., Higelin P., Dumand C., Revol E. Experimental investigation and 1D analytical approach on convective heat transfers in engine exhaust-type turbulent pulsating flows // *Applied Thermal Engineering*. 2020. Vol. 165. Article number 114548.
9. Kato Y., Guo G., Kamigaki M., Fujimoto K., Kawaguchi M., Nishida K., Koutoku M., Hongou H., Yanagida H., Ogata Y. An Examination of Heat Transfer Dynamics in Pulsating Air Flow within Pipes: Implications for Automotive Exhaust Engines // *International Journal of Heat and Technology*. 2023. Vol. 41(4). P. 815-826.
10. Тимербаев Н.Ф., Али А.К., Альмохаммед О.А.М., Корякин А.Р. Моделирование влияния продольного прямоугольного оребрения на эффективность теплообмена // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2019. Т. 21. № 4. С. 48-57.
11. De Maio M., Latini B., Nasuti F., Pirozzoli S. Direct numerical simulation of turbulent flow in pipes with realistic large roughness at the wall // *Journal of Fluid Mechanics*. 2023. Vol. 974. Article number A40.
12. Xifeng W., Xiaoluan Z., Mahariq I., Ghalandari M., Ghadak F., Abedini M. Performance Optimization of the Helical Heat Exchanger With Turbulator // *Frontiers in Energy Research*, 2022, 9, 789316.
13. Nikitin N. Turbulent secondary flows in channels with no-slip and shear-free boundaries // *Journal of Fluid Mechanics*. 2021. Vol. 917.
14. Kumar R., Varun, Kumar A. Thermal and fluid dynamic characteristics of flow through triangular cross-sectional duct: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 61. P. 123-140.
15. Guo G., Kamigaki M., Inoue Y., Nishida K., Hongou H., Koutoku M., Yamamoto R., Yokohata, H., Sumi S., Ogata Y. Experimental study and conjugate heat transfer simulation of pulsating flow in straight and 90° curved square pipes // *Energies*. 2021. Vol. 14(13). Article number 3953.
16. Nikitin N. Wall friction and heat transfer in turbulent pulsating flow in a square duct // *International Journal of Thermal Sciences*. 2024. Vol. 196. Article number 108679.
17. Pirozzoli S., Modesti D., Orlandi P., Grasso F. Turbulence and secondary motions in square duct flow // *Journal of Fluid Mechanics*. 2018. Vol. 840. 631-655.
18. Zhang L., Tian L., Zhang A., Chen H. Effects of the shape of tube and flow field on fluid flow and heat transfer // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 117. Article number 104782.

19. Kurtulmuş N., Sahin B. Experimental investigation of pulsating flow structures and heat transfer characteristics in sinusoidal channels // International Journal of Mechanical Sciences. 2020. Vol. 167. Article number 105268.

20. Nikitin N.V., Popelenskaya N.V., Stroh A. Prandtl's Secondary Flows of the Second Kind. Problems of Description, Prediction, and Simulation // Fluid Dynamics. 2021. Vol. 56(4). P. 513-538.

21. Плотников Л.В., Бродов Ю.М., Жилкин Б.П., Невولين А.М., Мисник М.О. Физическое и численное моделирование тепломеханических характеристик стационарных потоков в газоздушных трактах поршневых двигателей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 5. С.22-28.

22. Plotnikov L.V. Gas dynamics and heat exchange of stationary and pulsating air flows during cylinder filling process through different configurations of the cylinder head channel (applicable to piston engines) // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2024. Vol. 233. Article number 126041.

23. Plotnikov L., Plotnikov I., Osipov L., Slednev V., Shurupov V. An Indirect Method for Determining the Local Heat Transfer Coefficient of Gas Flows in Pipelines // Sensors. 2022. Vol. 22 (17). Article number 6395.

24. Плотников Л.В., Григорьев Н.И., Осипов Л.Е., Десятов К.О. Расчетно-экспериментальная оценка интенсивности теплоотдачи стационарных потоков газа в трубах с разными поперечными сечениями с учетом турбулизации течения // Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14, №5. С. 218–224.

25. Plotnikov L.V. Thermal-mechanical characteristics of stationary and pulsating gas flows in a gas-dynamic system (in relation to the exhaust system of an engine) // Thermal Science. 2022. Vol. 26(1A). P. 365-376.

26. Davletshin I.A., Mikheev N.I., Paereliy A.A., Gazizov I.M. Convective heat transfer in the channel entrance with a square leading edge under forced flow pulsations // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 129. P. 74-85.

27. Wang X., Zhang N. Numerical analysis of heat transfer in pulsating turbulent flow in a pipe // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2005. Vol. 48(19). P. 3957-3970.

28. Terekhov V.I. Heat Transfer in Highly Turbulent Separated Flows: A Review // Energies. 2021. Vol. 14. Article number 1005.

Авторы публикации

Плотников Леонид Валерьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия. E-mail: leonplot@mail.ru

Осипов Леонид Евгеньевич – преподаватель кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия. E-mail: klumbaa@outlook.com

Григорьев Никита Игоревич – канд. техн. наук, технический директор ООО «Уральский дизель-моторный завод»; доцент кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия. E-mail: gepebola3@mail.ru

Пonomarev Дмитрий Алексеевич – начальник бюро ООО «Уральский дизель-моторный завод», г. Екатеринбург, Россия. E-mail: ponomarevda@udmw.ru

Плотников Олег Алексеевич – аспирант кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия. E-mail: olega.plotnikov97@mail.ru

References

1. Yang K.-S., Jiang M.-Y., Tseng C.-Y., Wu S.-K., Shyu J.-C. Experimental investigation on the thermal performance of pulsating heat pipe heat exchangers. Energies, 2020;13(1):269.

2. Matouq J., Al-Waked R., Al-Rashdan M., Mustafa D.B., Nasif M.S. Computational Fluid Dynamics Analysis of Slip Flow and Heat Transfer at the Entrance Region of a Circular Pipe. Applied Sciences (Switzerland), 2024;14(15):6528.

3. Winkler N. Effect of pressure oscillations on in-cylinder heat transfer - Through large eddy simulation. International Journal of Engine Research, 2015;16(6):705-715.

4. Nishandar S.V., Pise A.T., Bagade P.M., Gaikwad M.U., Singh A. Computational modelling and analysis of heat transfer enhancement in straight circular pipe with pulsating flow. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2024.
5. Hayrullin A., Haibullina A., Sinyavin A., Ilyin V. Experimental study of the in-line tube bundle thermal performance in pulsating flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024;232:125916.
6. van Buren S., Miranda A.C., Polifke W. Large eddy simulation of enhanced heat transfer in pulsatile turbulent channel flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019;144:118585.
7. Nakamura H., Saito R., Yamada S. Delay in response of turbulent heat transfer against acceleration or deceleration of flow in a pipe. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2020;85:108661.
8. Simonetti M., Caillol C., Higelin P., Dumand C., Revol E. Experimental investigation and 1D analytical approach on convective heat transfers in engine exhaust-type turbulent pulsating flows. *Applied Thermal Engineering*, 2020;165:114548.
9. Kato Y., Guo G., Kamigaki M., Fujimoto K., Kawaguchi M., Nishida K., Koutoku M., Hongou H., Yanagida H., Ogata Y. An Examination of Heat Transfer Dynamics in Pulsating Air Flow within Pipes: Implications for Automotive Exhaust Engines. *International Journal of Heat and Technology*, 2023;41(4):815-826.
10. Timerbaev N.F., Ali A.K., Almohamed O., Koryakin A.R. Simulation of the effectiveness of longitudinal rectangular fins on the efficiency of the double pipe heat exchanger. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(4):48-57. (In Russ)
11. De Maio M., Latini B., Nasuti F., Pirozzoli S. Direct numerical simulation of turbulent flow in pipes with realistic large roughness at the wall // *Journal of Fluid Mechanics*, 2023;974:A40.
12. Xifeng W., Xiaoluan Z., Mahariq I., Ghalandari M., Ghadak F., Abedini M. Performance Optimization of the Helical Heat Exchanger With Turbulator. *Frontiers in Energy Research*, 2022;9:789316.
13. Nikitin N. Turbulent secondary flows in channels with no-slip and shear-free boundaries. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021;917.
14. Kumar R., Varun, Kumar A. Thermal and fluid dynamic characteristics of flow through triangular cross-sectional duct: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016;61:123-140.
15. Guo G., Kamigaki M., Inoue Y., Nishida K., Hongou H., Koutoku M., Yamamoto R., Yokohata, H., Sumi S., Ogata Y. Experimental study and conjugate heat transfer simulation of pulsating flow in straight and 90° curved square pipes. *Energies*, 2021;14 (13):3953.
16. Nikitin N. Wall friction and heat transfer in turbulent pulsating flow in a square duct. *International Journal of Thermal Sciences*, 2024;196:108679.
17. Pirozzoli S., Modesti D., Orlandi P., Grasso F. Turbulence and secondary motions in square duct flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 2018;840:631-655.
18. Zhang L., Tian L., Zhang A., Chen H. Effects of the shape of tube and flow field on fluid flow and heat transfer. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020;117:104782.
19. Kurtulmuş N., Sahin B. Experimental investigation of pulsating flow structures and heat transfer characteristics in sinusoidal channels. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020;167:105268.
20. Nikitin N.V., Popelenskaya N.V., Stroh A. Prandtl's Secondary Flows of the Second Kind. Problems of Description, Prediction, and Simulation. *Fluid Dynamics*, 2021;56(4):513-538.
21. Plotnikov LV, Brodov YM, Zhilkin BP, Nevolin AM, Misnik MO. Physical and numerical simulation of the thermal and mechanical characteristics of stationary flows in the gas air paths of piston engines. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(5):22-28. (In Russ)
22. Plotnikov L.V. Gas dynamics and heat exchange of stationary and pulsating air flows during cylinder filling process through different configurations of the cylinder head channel (applicable to piston engines). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024;233:126041.
23. Plotnikov L., Plotnikov I., Osipov L., Slednev V., Shurupov V. An Indirect Method for Determining the Local Heat Transfer Coefficient of Gas Flows in Pipelines. *Sensors*, 2022;22(17):6395.
24. Plotnikov L.V., Grigoriev N.I., Osipov L.E., Desyatov K.O. Computational and experimental estimation of the heat transfer intensity of stationary gas flows in pipes with different cross sections, taking into account flow turbulence. *Thermal processes in engineering*, 2022;14(5):218-224. (In Russ)
25. Plotnikov L.V. Thermal-mechanical characteristics of stationary and pulsating gas flows in a gas-dynamic system (in relation to the exhaust system of an engine). *Thermal Science*, 2022;26(1A):365-376.
26. Davletshin I.A., Mikhhev N.I., Paereliy A.A., Gazizov I.M. Convective heat transfer in the channel entrance with a square leading edge under forced flow pulsations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019;129:74-85.
27. Wang X., Zhang N. Numerical analysis of heat transfer in pulsating turbulent flow in a pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005;48(19):3957-3970.
28. Terekhov V.I. Heat Transfer in Highly Turbulent Separated Flows: A Review. *Energies*, 2021;14:1005.

Authors of the publication

Leonid V. Plotnikov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: leonplot@mail.ru

Leonid E. Osipov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: klumbaa@outlook.com

Nikita I. Grigoriev – Ural Diesel Engine Plant LLC; Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: gepebola3@mail.ru

Dmitry A. Ponomarev – Ural Diesel Engine Plant LLC, Ekaterinburg, Russia. E-mail: ponomarevda@udmw.ru

Oleg A. Plotnikov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: olega.plotnikov97@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **14.08.2024 г.**

Отредактировано **22.10.2024 г.**

Принято **25.10.2024 г.**



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ УЧАСТКЕ ПРОИЗВОДСТВА ЭТИЛЕНА

Бальзамов Д.С.¹, Бронская В.В.²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

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

dbalzamov@mail.ru

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Вопросы эффективного использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в промышленном секторе Российской Федерации являются актуальными на протяжении последних десятилетий, что подтверждается изданием различных законодательных актов и нормативных документов на федеральном и региональном уровне. Структура энергетических комплексов действующих предприятий органического синтеза формировалась в условиях взаимосвязи с внешними системами обеспечения энергоресурсами в период их низких внутренних цен. Эти факторы обусловили низкую системную энергоэффективность технологических комплексов в настоящее время и необходимость системного подхода при перспективном планировании направлений развития энергетики действующих предприятий. В соответствии со стратегией развития и модернизации топливно-энергетического комплекса России, направления развития систем обеспечения энергоресурсами предприятий органического синтеза определены в областях ресурсосбережения и создания энерготехнологических комплексов на основе эффективных источников электро- и теплоснабжения в условиях совершенствования основных технологических процессов. **ЦЕЛЬ.** Целью данной работы является исследование теплопотребляющих технологических узлов линии производства этилена на предмет эффективного использования тепловой энергии. Определить потенциал энергосбережения и разработать мероприятия по оптимизации теплопотребления на рассматриваемом производственном участке. **МЕТОДЫ.** Для достижения поставленной цели использовался метод энерготехнологического комбинирования и системного анализа теплотехнологий. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В данной работе проведено исследование работы узла приготовления питательной воды, узла откачки парового конденсата, установки промывки пиролизного газа (пирогаз), узла приготовления пара разбавления участка пиролиза производства этилена в рамках энергетического обследования предприятия в целом. В результате исследования была выполнена оценка тепловых потерь в технологических секциях, составлен материальный баланс технологических потоков, определены возможные резервы экономии тепловой энергии. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Определено, что использование тепла, отводимого в узел щелочной промывки питательной воды для подогрева частично осветленной воды, подаваемой на деаэратор с установкой дополнительного теплообменника на участке подготовки питательной воды и откачки конденсата, позволит сэкономить водяной пар давлением 3,5 кгс/см² и обратную воду. На участке водной промывки пиролизного газа экономию тепловой энергии можно достичь путем увеличения коэффициента теплообмена за счет удаления углеводородов из конденсата пара разбавления. Для секции приготовления пара разбавления предложено схемное решение, направленное использовать энергетический потенциал паро-конденсатной смеси греющего пара путем внедрения парожжекторной установки за теплообменником. Предложенная схема позволит получить экономический эффект 6400 Гкал/год, что в денежном выражении составит 5120 тыс. руб./год, а срок окупаемости 1,2 года.

Ключевые слова: энергоэффективность; вторичные энергетические ресурсы; теплотехнология; пиролиз; тепловой баланс; закально-испарительный аппарат; котел-утилизатор.

Для цитирования: Бальзамов Д.С., Бронская В.В. Повышение эффективности использования тепловой энергии на теплотехнологическом участке производства этилена //

INCREASING THE EFFICIENCY OF THERMAL ENERGY USE AT THE THERMAL TECHNOLOGY SECTION OF ETHYLENE PRODUCTION

Balzamov D.S.¹, Bronskaya V.V.²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

dbalzamov@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The issues of efficient use of fuel and energy resources in the industrial sector of the Russian Federation have been topical for the last decades, which is confirmed by the issuance of various legislative acts and regulatory documents at the federal and regional levels. The structure of energy complexes of operating organic synthesis enterprises was formed in conditions of interconnection with external systems of energy resources supply in the period of their low internal prices. These factors have caused the low system energy efficiency of technological complexes at the present time and the need for a systematic approach to the prospective planning of energy development directions of operating enterprises. In accordance with the strategy of development and modernization of the fuel and energy complex of Russia, the directions of development of energy supply systems of organic synthesis enterprises are defined in the areas of resource conservation and creation of energy technological complexes based on efficient sources of electricity and heat supply under the conditions of improvement of the main technological processes. *THE PURPOSE.* The purpose of this work is to study the heat-consuming technological units of the ethylene production line for the efficient use of thermal energy. Determine the energy saving potential and develop measures to optimize heat consumption at the considered production site. *METHODS.* In this work we have studied the operation of feed water preparation unit, steam condensate pumping unit, pyrolysis gas (pyrogas) washing unit, dilution steam preparation unit of ethylene production pyrolysis section within the framework of energy inspection of the enterprise as a whole. As a result of the survey, heat losses in technological sections were assessed, material balance of technological flows was drawn up, and possible reserves of heat energy saving were determined. *CONCLUSION.* It is determined that the use of heat discharged to the feed water alkaline flushing unit for heating of partially clarified water supplied to the deaerator with the installation of an additional heat exchanger at the feed water preparation and condensate pumping section will save water steam with pressure of 3.5 kgf/cm² and recycled water. At the section of water washing of pyrolysis gas, heat energy saving can be achieved by increasing the heat exchange coefficient by removing hydrocarbons from the dilution steam condensate. For the dilution steam preparation section a scheme solution is proposed, aimed at using the energy potential of steam-condensate mixture of heating steam by introducing a steam ejector unit behind the heat exchanger. The offered scheme will allow to receive economic effect 6400 Gcal/year, that in monetary terms will make 5120 thousand rubles/year, and payback period 1,2 years.

Keywords: energy efficiency; secondary energy resources; heat technology; pyrolysis; thermal balance; quenching and evaporation apparatus; heat recovery boiler.

For citation: Balzamov D.S., Bronskaya V.V. Increasing the efficiency of thermal energy use at the thermal technology section of ethylene production. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (1): 103-115. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-103-115.

Введение (Introduction)

Этилен является универсальным химическим материалом и считается одним из базовых продуктов химической промышленности вместе с пропиленом и ароматическими соединениями. Мировое потребление этилена, а следовательно, и его производство растет с каждым годом в среднем на 3% [1-3].

Как универсальный материал, этилен широко используется в производстве различных химических продуктов и полимеров, например, винилхлорида (Ма, 2020), оксида

этилена (Пио и Салзано, 2020), дихлорэтана (Аль-Захрани, 2001), полиэтилена и других востребованных органических продуктов.

Производство этилена является крупнейшим потребителем топливно-энергетических ресурсов. В зависимости от производственной мощности предприятия годовое энергопотребление при производстве этилена составляет 8 838 т.у.т топлива (в том числе природного газа и этана), 730 000 Гкал тепловой энергии (в виде водяного пара и теплофикационной воды), 600 000 МВтч электрической энергии. Задача разработки решений по эффективному потреблению энергоресурсов и снижению энергоемкости готовой продукции с каждым годом становится актуальнее как в России, так и во всем мире [4-7]. В качестве перспективного направления энергосбережения можно отметить формирование систем утилизации вторичных энергоресурсов в основных узлах теплотехнологической линии.

Литературный обзор (Literature Review)

Задачи повышения энергетической эффективности крупнотоннажных нефтехимических производств рассматривались в работах зарубежных и отечественных ученых, среди которых можно выделить Симонова В., Назмеева Ю., Конахину И., Башмакова И., Дж. Ролса и многих других [7].

Несмотря на полученные результаты в научном решении проблемы энергосбережения, имеются некоторые ее аспекты, главным образом в промышленном производстве, которые требуют дальнейших углубленных исследований. Специфика деятельности промышленных предприятий может иметь отличия, несмотря на выпуск одного и того же органического продукта. В некоторых случаях мероприятия, которые показали высокую эффективность на одном предприятии, могут быть убыточными на другом объекте [8].

В [3] авторы отмечают, что в большинстве моделей конечного использования энергоресурсов промышленными системами отсутствует описание технологий и процедур, в том числе не хватает реальных эксплуатационных данных. Это серьезный недостаток существующих моделей, поскольку потребление энергии определяется составом оборудования и режимами технологического процесса.

В работах [3, 4] исследуется оптимизация работы паровых крекинг-установок в производстве этилена, в результате чего авторы определили, что экспорт или импорт пара на соседние установки или комплексы может увеличить финансовую выгоду, а оптимизация внутреннего управления водяным паром позволила минимизировать потребление пара и привела к снижению потребления топлива паровыми котлами крекинг-установки на 5 %.

Материалы и методы (Materials and methods)

В данной работе рассматривается оптимизация теплотребления технологического участка производства этилена. Выполнен комплексный анализ структуры выработки и потребления тепловой энергии в таких технологических узлах как узел приготовления питательной воды, узел откачки парового конденсата, узел промывки пиролизного газа (пирогаз), узел приготовления пара разбавления.

Структура выработки, потребления и отпуска тепловой энергии на технологические и хозяйственные нужды представлена на рисунке 1 [9].

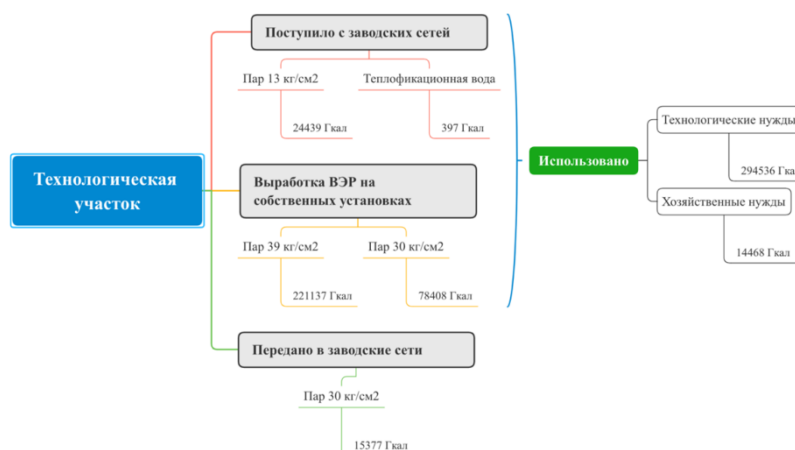


Рис. 1. Получение, выработка, потребление и отпуск тепловой энергии пара и теплофикационной воды на производственном

Fig. 1. Receipt, generation, consumption and supply of steam heat energy and heating water at the production site

участке

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

Анализ работы паро-конденсатной схемы технологического участка производства этилена.

Пар из заводского паропровода давлением 13 кг/см^2 подается в основной паропровод технологического участка производства этилена (рис. 2). Туда же поступает водяной пар от котлов утилизаторов КУ-80 (позиция А, Б) и закально-испарительных аппаратов (ЗИА), дросселируемый до давления 13 кг/см^2 . Далее пар разделяется на четыре потока [10]:

1. Поток с давлением 13 кг/см^2 подается в испарители Т-204 узла получения пара разбавления;

2. Второй поток после снижения его давления до 7 кг/см^2 , совместно с паром от Е-202 (Т-204) поступает в качестве пара разбавления на узел печей пиролиза;

3. Третий поток после снижения его давления до $6,5 \text{ кг/см}^2$ подается в узел печей пиролиза для продувки топок, на паротушение и для обогрева теплоспутников;

4. Четвертый поток после снижения его давления с $6,5 \text{ кг/см}^2$ до $3,5 \text{ кг/см}^2$ совместно с паром вторичного вскипания с сепараторов Е-108 узла подготовки питательной воды и сбора продувочных вод поступает в подогреватели Т-102, Т-103, Т-212, Т-217, в деаэрационный бак Е-102, в колонну К-202, в обогревающий элемент факельной емкости, а также используется для пропарки аппаратов и трубопроводов.

Часть пара давлением $3,5 \text{ кг/см}^2$ поступает в цех газоразделения в кипятильники Т-316 (позиции А, Б) этановой колонны К-302, в Т-344 и Т-344а пропановой колонны К-306 и К-306а, в подогреватель Т-338, испарители Т-357 и Т-358, в теплообменник Т-353, в змеевики емкостей жидких продуктов газоразделения, в стояки для пропарки и паротушения, а также на обогрев шкафов контрольно-измерительных приборов (КИП).

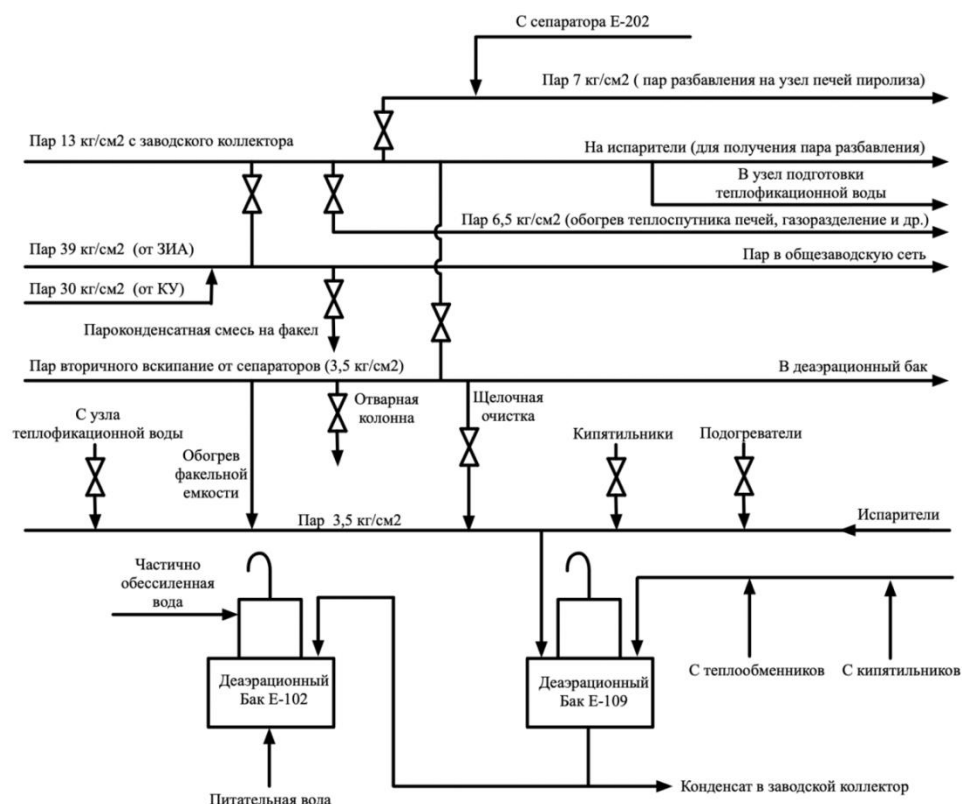


Рис. 2. Паро-конденсатная схема технологического участка Fig. 2. Steam-condensate scheme of the process section

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

Использование пара, вырабатываемого на теплоутилизационных установках технологического участка, имеет приоритетный характер. Пар из паропроводов завода подается для стабилизации параметров давления в паропроводах технологического участка производства этилена и для поддержания в рабочем состоянии магистральных паропроводов паровой сети завода [7, 9, 10].

По целевому назначению использования пара, поступающего на технологические нужды, можно классифицировать следующим образом:

- Впрыск пара в пирогаз для обеспечения необходимого парциального давления и снижения коксования поверхностей теплообмена печей пиролиза и ЗИА со стороны пирогаза;

- Обогрев кипятильников ректификационных колонн в соответствии с параметрами, обусловленными технологическим регламентом;

- Подогрев промежуточных теплоносителей локальных циклов: теплофикационного и метанолового (от теплофикационного цикла подается вода для обогрева технологических спутников);

- Догрев и деаэрация частично-обессоленной воды (ЧОВ) и дымовых газов, а также на узел щелочной отмывки;

- Обогрев сборных емкостей цикла газоразделения;

- Обогрев линий подачи сырья на печи пиролиза;

- Пропарка аппаратов и трубопроводов всех узлов цеха;

- Продувка змеевиков печей пиролиза, находящихся в горячем резерве и при паровоздушном выжиге кокса.

Количественно водяного пара по направлениям теплоснабжения представлено в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Распределение пара, подаваемого к технологическим потребителям

Distribution of steam supplied to process consumers

№	Давление пара, кг/см ²	Потребитель	Расход пара, т/ч
1	30	Т-341 – подогреватель активации свежего катализатора (узел гидрирования)	0,25
2	13	На теплофикацию (Теплоспутниковые аппараты)	4,0
		Т-204 (А,Б,В,Г,Д) – испарители (узел приготовления пара разбавления)	21,0
3	7	В линию пара разбавления	
4	6,5	Для продувки топок, паротушения, в линию обогрева теплоспутников продуктов на печи пиролиза	1,4
		Т-108 – дополнительный подогрев пара разбавления	0,3
5	3,5	Т-102, Т-103 – подогрев этана и метановодородной фракции (МВФ)	2,5
		К-102 – отпарная колонна (узел водной отмывки пирогаза)	0,9
		К-103 – на деаэрацию Е-102	5,5
		Т-212, Т-217 – узел щелочной отмывки пирогаза	1,5
		Т-344, Т-344а – кипятильники пропановой колонны К-306	1,1
		Т-316а, Т-316б – кипятильники этановой колонны К-302	9,0
		Т-357, Т-358 – обогреватели-испарители метанола	0,8
		Т-338 – подогреватель этан-этиленовой фракции (ЭЭФ) (узел гидрирования)	3,1
		Т-353 – испаритель пропана перед подачей в цех	0,16
		Обогрев факельной емкости Е-222	0,6
		Пропарка аппаратов и трубопроводов	2,2
		Обогрев змеевиков емкости газоразделения	2,0
Итого			56,31

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

Часть потребности в теплоснабжении рассматриваемого производственного участка обеспечивается за счет тепла встречных технологических потоков:

- Нагрев питательной воды, подаваемой в деаэрацию, осуществляется за счет тепла конденсата технологических потребителей производственного участка. Охлажденный конденсат поступает в заводские сети;

- Нагрев кубового продукта в кипятильнике Т-346 колонны К-307 и Т-348(А,Б) колонны К-308б осуществляется за счет тепла циркуляционной воды цикла первичной отмывки и охлаждения пирогаза;

- Нагрев газообразной этан-этиленовой фракции в теплообменниках обратных потоков Т-336, Т-337 за счет тепла прогидрированной этан-этиленовой фракции;

- Подогрев куба этиленовой колонны К-303 осуществляется за счет конденсации этилена в кипятильниках Т-319 (А,Б) после его компримирования в компрессоре В-404 на выходе из колонны К-303. Таким образом этиленовая колонна К-303 совместно с компрессором К-404 работает в режиме теплового насоса.

Значительная часть теплообменного оборудования в цикле газоразделения рассматриваемого технологического участка производства этилена функционирует, используя тепло или холод встречных технологических потоков [11-13]. Несмотря на такую организацию, существует потребность в снижении теплопотребления на технологические нужды производственного участка. Далее выполнена оценка теплопотерь в технологических узлах рассматриваемого участка.

Анализ работы узла приготовления питательной воды

В представленной на рисунке 3 схеме подготовки питательной воды, сброса продувочных вод и откачки парового конденсата применен ряд технических решений, направленных на снижение теплopotребления на участке производства этилена:

- Подогрев питательной воды теплом конденсата от потребителей пара, откачиваемого в общие заводские сети;
- Сепарация продувок от КУ-80 (А,Б) и ЗИА с использованием отсепарированного пара в технологическом цикле участка по производству этилена;
- Использование продувочных вод после сепараторов для подачи на отпарную колонну К-202.

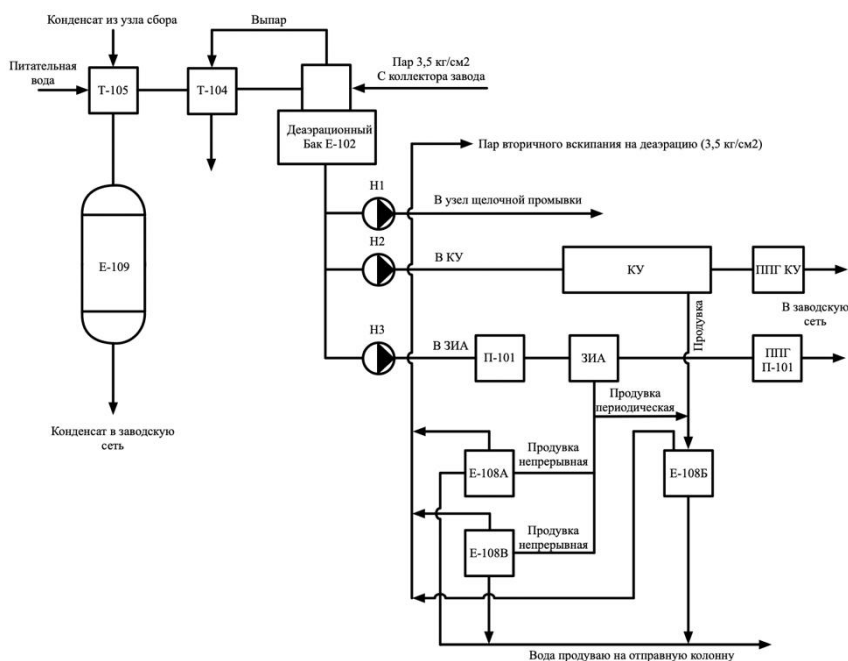


Рис. 3. Узел подготовки питательной воды, сброса продувочных вод и откачки парового конденсата на технологическом участке производства этилена

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

Материальный баланс узла подготовки питательной воды и откачки парового конденсата представлен на рисунке 4.

Анализируя схему узла подготовки питательной воды и сбора конденсата, а также ее материальный баланс можно определить возможные резервы экономии тепловой энергии:

- Использование тепла, отводимого в узел щелочной промывки питательной воды (с температурой 102°C и расходом 9 т/ч) для подогрева частично осветленной воды, подаваемой на деаэратор. Существующего подогрева питательной воды конденсатом явно недостаточно, его объем не более 15-18 т/ч при расходе частично-обессоленной воды (ЧОВ) 62-68 т/ч. Потоки ЧОВ можно разделить, установив дополнительный теплообменник для подогрева питательной воды, подаваемой на щелочную отмывку. Это позволит сэкономить пар давлением 3,5 кг/см², подаваемый на деаэрацию, а также оборотную воду, расходуемую в цикле щелочной отмывки на охлаждение питательной воды.

• Захлаживание конденсата от кипятильников Т-316 А,Б целесообразно производить до сборного бака конденсата. Это уменьшит объем пара вторичного вскипания в конденсатном баке и потери с выпаром.

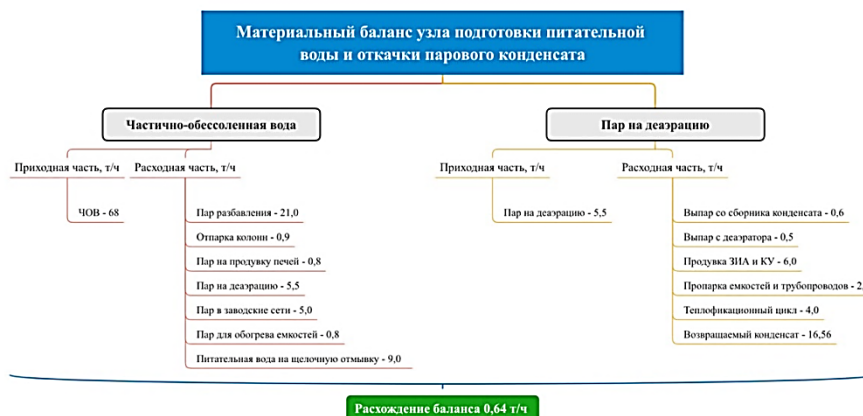


Рис. 4. Материальный баланс узла подготовки питательной воды и откачки конденсата

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

Анализ работы узла водной промывки пирогаза

Схема водной промывки пирогаза представлена на рисунке 5.

Пирогаз, поступающий от ЗИА на колонну К-201 водной промывки пирогаза охлаждается за счет циркуляционной воды (общий объем циркуляции 800 м³/ч). В соответствии с технологическим регламентом температура циркуляционной воды на выходе из К-201 составляет 75-90°C, при поступлении после охлаждения в верхнюю часть колонны составляет 35-45°C, а в среднюю часть колонны – 55-65°C [14, 15].

При этом большая часть тепла циркуляционной воды отводится в атмосферу на воздушных холодильниках Т-201, а также через пропиленовые холодильники Т-203 и Т-225. Часть тепла циркуляционной воды полезно используется в технологическом цикле, в частности в кипятильниках колонн К-307 и К-308 (А,Б) схемы концентрирования пропилена, для подогрева кубовых продуктов до температуры 49°C и 53°C соответственно.

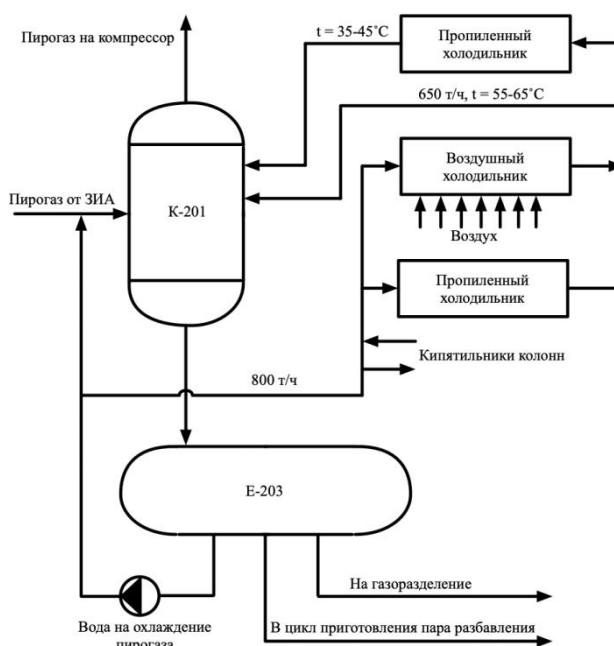


Рис. 5. Схема водной промывки пиролизного газа

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

В результате образуется теплоноситель в виде химически загрязненной воды в объеме 780-800 м³/ч, которая охлаждается с температуры 75-90°C до 55-65°C (в объеме 630-

600 м³) и до температуры 35-45°C (в объеме 150-160 м³), затрачивая при этом электроэнергию на работу циркуляционных насосов, вентиляторов воздушных холодильников, на приготовление и подачу хладагента в виде жидкого пропилена из холодильного цикла пропилена.

Суммарные затраты электроэнергии составляют порядка 2,0-2,3 кВтч/т циркуляционной воды. Возможности утилизации тепла циркуляционной воды цикла водной промывки пирогаза ограничены из-за значительного загрязнения циркуляционной воды коксом и смолами, затрудняющих работу теплообменного оборудования.

Эффективный вывод из цикла образовавшихся в процессе водной отмывки конденсата пара разбавления углеводородов может сократить затраты электроэнергии на охлаждение за счет увеличения коэффициента теплообмена на охлаждающем теплообменном оборудовании и создать предпосылки для эффективной утилизации тепла циркуляционной воды [14, 16].

Анализ работы узла приготовления пара разбавления

Наиболее крупным потребителем пара давлением 13 кг/см² в технологическом цикле участка производства этилена является узел приготовления пара разбавления (до 25% от общего потребления тепла на технологию).

Пар разбавления получается из химически загрязненной циркуляционной воды, подающейся последовательно в теплообменник предварительного нагрева Т-202 и испарительный теплообменник Т-204. В теплообменнике Т-202 происходит нагрев химически загрязненной циркуляционной воды конденсатом греющего пара давлением 13 кг/см² из теплообменника Т-204. Схема узла приготовления пара разбавления представлена на рисунке 6.

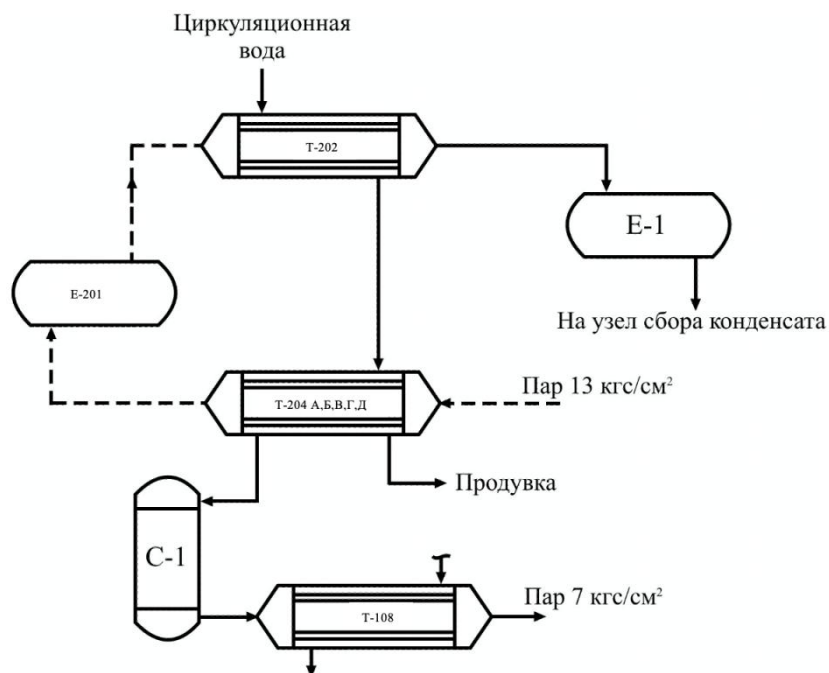


Рис. 6. Схема узла приготовления пара разбавления Fig. 6. Schematic diagram of the dilution steam preparation unit

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

В теплообменнике Т-204 происходит испарение химически загрязненной циркуляционной воды, кипящей в межтрубном пространстве за счет конденсации греющего пара давлением 13 кг/см², подающегося из цехового коллектора. Греющий пар, конденсируясь в теплообменнике Т-204, подается в виде паро-конденсатной смеси в теплообменник Т-202, где захлаживается химически загрязненной циркуляционной водой. Получившийся из химически загрязненной воды в теплообменнике Т-204 пар разбавления давлением 7 кг/см² подается через сепаратор Е-201 и теплообменник Т-108 на впрыск в пирогаз на печах пиролиза [17].

Схема приготовления пара разбавления из химически загрязненной циркуляционной воды обеспечивает снижение объемов химически загрязненных стоков, отводимых на очистные сооружения.

Температура конденсата греющего пара давлением 13 кг/см^2 после теплообменника Т-202 составляет $125-135^\circ\text{C}$, что приводит к образованию пара вторичного вскипания на узле сбора конденсата. Установка сепаратора с парожекторной установкой на выходе конденсата с Т-202 позволит использовать тепло пара вторичного вскипания в технологическом цикле, снизить температуру конденсата при поступлении на узел сбора конденсата, исключить догрев пара разбавления в Т-108.

Результаты (Results)

На рисунке 7 представлена предлагаемая схема, предназначенная для использования энергетического потенциала паро-конденсатной смеси греющего пара на выходе из Т-202. Теплосодержание соответствует температуре выхода $t = 129^\circ\text{C}$ (рассчитанной по балансу) $q_{\text{вых.}} - 132,8 \text{ ккал/кг}$.

Суть предлагаемой схемы заключается в установке за теплообменником Т-202 парожекторной установки, поддерживающей давление в сепараторе на уровне $1,1 \text{ ат}$ ($0,1 \text{ кг/см}^2$), а так же обеспечивающей отвод и смешивание пара вторичного вскипания из сепаратора с рабочим паром эжектора (13 кг/см^2), для получения пара смешения с давлением $3,5 \text{ кг/см}^2$, который в дальнейшем подается в цеховой коллектор $3,5 \text{ кг/см}^2$.

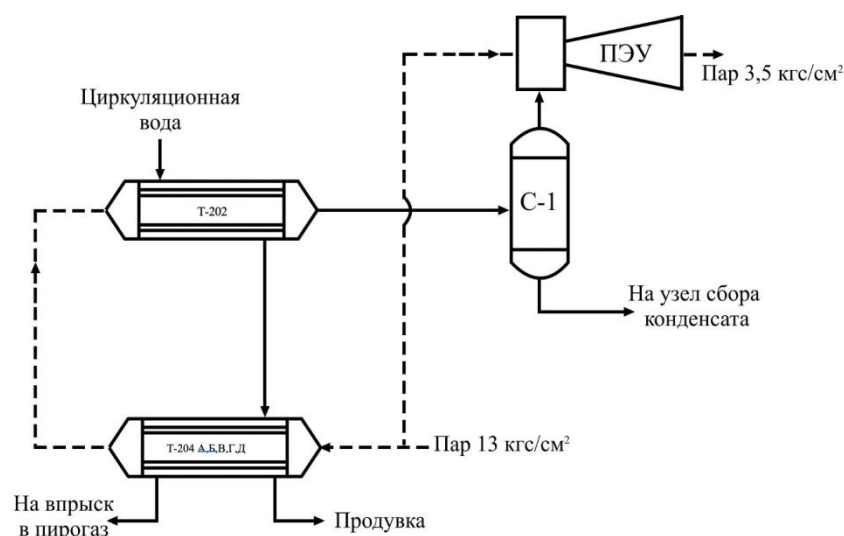


Рис. 7. Предлагаемая схема получения пара разбавления Fig. 7. Proposed scheme for obtaining dilution vapor

ПЭУ – Парокомпрессионная эжекционная установка PEU – Steam Compression Ejection Unit

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

Предлагаемая схема позволяет:

- обеспечить дополнительное использование тепла паро-конденсатной смеси греющего пара ($P = 13 \text{ кг/см}^2$) за счет извлечения пара вторичного вскипания в сепараторе;
- обеспечить повышение давления пара вторичного вскипания на парокомпрессорной эжекторной установке до $3,5 \text{ кг/см}^2$, что позволит использовать его в технологическом цикле;
- стабилизировать захлаживание конденсата до температуры 102°C перед подачей на узел сбора конденсата;
- отказаться от догрева пара разбавления на теплообменнике Т-108;
- получить экономический эффект от использования пара вторичного вскипания на уровне 6400 Гкал/год .

Расчет экономии тепловой энергии при внедрении технологии

Тепловой баланс теплообменников Т-202, Т-204:

- данные для расчета (принимаются по технологическому регламенту);
- температура химически загрязненной циркуляционной воды: перед Т-202 $t_1 = 100^\circ\text{C}$, после Т-202 $t_2 = 165^\circ\text{C}$;
- температура и скрытая теплота парообразования пара разбавления (7 кг/см^2) $t_{\text{п.р.}} = 170^\circ\text{C}$, $r_{\text{п.р.}} = 488,8 \text{ ккал/кг}$;
- температура и скрытая теплота парообразования греющего пара (13 кг/см^2) $t_{\text{гр.п.}} = 195^\circ\text{C}$, $r_{\text{гр.п.}} = 467,7 \text{ ккал/кг}$.

Расход пара разбавления принимаем по рабочим листам $G_{п.р.} = 20$ т/ч.

Тепловой баланс теплообменника Т-204:

$$Q_{п.р.} = Q_{гр.п.}$$

где $Q_{п.р.}$ – тепло, подводимое греющим паром;

$Q_{гр.п.}$ – тепло, получаемое паром разбавления и определяется по формуле.

$$Q_{гр.п.} = G_{гр.п.} \cdot r_{гр.п.}$$

где $G_{гр.п.}$ – объём продувок из пара разбавления, выводимых из теплообменника Т-204. В соответствии с технологическим регламентом принимается равным 6% от общего количества пара разбавления.

$$Q_{п.р.} = (G_{гр.п.} - G_{прод.}) \cdot r_{гр.п.}$$

Тогда расход греющего пара, т/ч:

$$G_{гр.п.} = \frac{(G_{п.р.} - G_{прод.}) \cdot r_{п.р.}}{r_{гр.п.}} = \frac{(20 - 20 \cdot 0,06) \cdot 488,8}{467,7} = 19,65$$

Тепловой баланс теплообменника Т-202:

$$Q_{конд.гр.} = Q_{х.з.в.}$$

где $Q_{конд.гр.}$ – тепло, отдаваемое конденсатом греющего пара;

$Q_{х.з.в.}$ – тепло, получаемое химически загрязненной водой.

$$Q_{конд.гр.} = G_{гр.пир} \cdot \Delta t$$

где $\Delta t = t_{гр.п.} - t_{вых}$ – разность температур конденсата греющего пара на входе и выходе из Т-202.

$$\Delta t = \frac{Q_{х.з.в.}}{G_{гр.п.}} = \frac{G_{гр.п.} \cdot (t_2 - t_1)}{G_{гр.п.}} = \frac{20 \cdot (165 - 100)}{19,65} = 65^\circ\text{C}$$

где t_2 – температура циркуляционной воды на выходе из теплообменника Т-202;

t_1 – температура циркуляционной воды на входе в теплообменник Т-202.

Температура конденсата греющего пара на выходе из теплообменника Т-202 составит:

$$t_{вых.} = t_{гр.п.} - \Delta t = 195 - 65 = 130^\circ\text{C}$$

Возможное получение пара вторичного вскипания [4, 5]:

$$G_{п.вт.} = \frac{G_{п.к.} \cdot \Delta i_k}{r_{п.}} = \frac{19,65 \cdot (132,8 - 101)}{536} = 1,216 \text{ т/ч}$$

где Δi_k – разность теплосодержаний конденсата насыщенного пара при температуре 130°C (132,8 ккал/кг) и при температуре 100°C , соответствующее давлению 0,1 кг/см² на линии насыщения пара (101 ккал/кг);

$r_{п.}$ – скрытая теплота парообразования при давлении 0,1 кг/см² (538 ккал/кг).

Экономия тепла за год в натуральном выражении составит, Гкал/год:

$$Q_{эк.} = G_{п.вт.} \cdot T \cdot i_{п.} = 1,216 \cdot 7920 \cdot 665 = 6400$$

Экономия тепла за год в денежном выражении составит, руб./год:

$$\Delta_{эк.} = Q_{эк.} \cdot C_{т.э.} = 6400 \cdot 800 = 5120000$$

где T – время работы технологического цикла 3 очереди в течение года и составляет 7920 ч/год;

$i_{п.}$ – теплосодержание пара давлением 14 кг/см² составляет 665 ккал/кг (минимальное давление пара, из которого путем дросселирования получается пар давлением 3,5 кг/см² при существующей схеме теплоснабжения).

$C_{т.э.}$ – действующий тариф на тепловую энергию 800 руб./Гкал.

Затраты электроэнергии на перекачку конденсата из сепаратора на узел сбора конденсата составят, кВт·ч:

$$W = G_{конд.} \cdot T \cdot W_{к.} = 18,434 \cdot 7920 \cdot 0,3 = 43799,2$$

где $G_{конд.}$ – годовой объем перекачки конденсата, т/ч:

$$G_{конд.} = G_{п.к.} - G_{п.вт.} = 19,65 - 1,216 = 18,434$$

$W_{к.}$ – удельный расход электроэнергии на перекачку конденсата и составляет 0,3 кВт·ч/м³ в соответствии с техническими характеристиками конденсатного насоса Кс-50-55-2.

В стоимостном выражении затраты на перекачку конденсата составят, руб./год:

$$З = W \cdot C_{э.э.} = 43799,2 \cdot 4,8 = 210236$$

Годовой экономический эффект от внедрения новой схемы составит, руб.:

$$\Delta_3 = \Delta - З = 5120000 - 210236 = 4909764$$

Ориентировочные затраты на внедрение (K_3) составят:

- проектирование – 500 тыс. руб.;

- стоимость паро-компрессорной установки, бака сепаратора, насосов откачки конденсата и прочего оборудования – 3500 тыс. руб.;
 - стоимость монтажа и обвязки – 1000 тыс. руб.;
 - установка регуляторов и автоматики – 600 тыс. руб.
- Итого затраты на внедрение составят 5600 тыс. руб.
Срок окупаемости предлагаемого решения составит, лет:

$$W = \frac{K_3}{\Xi_3} = \frac{5600000}{4909764} = 1,2$$

Заключение (Conclusions)

В технологическом цикле используется тепло конденсата, собираемого от технологических потребителей, тепло выпара деаэратора, тепло встречных технологических потоков. Вырабатываемый водяной пар ВЭР давлением 39 кг/см² и конденсат от теплоиспользующего оборудования частично передается в заводские сети. От локального теплофикационного цикла технологической схемы производится подпитка подающего теплофикационного заводского трубопровода.

Резервы экономии энергоресурсов связаны с использованием высокого давления пара, вырабатываемого на теплоутилизационном оборудовании рассмотренной схемы, который при использовании в технологическом цикле многократно дросселируется с 30 кг/см² до 13 кг/см² и далее до 6,5 кг/см² и 3,5 кг/см².

Экономия тепловой энергии может быть получена от расширения использования тепла встречных технологических потоков, а именно, нагрев пирогаза перед щелочной отмывкой с использованием тепла питательной воды, подаваемой после деаэратора на щелочную отмывку.

Также экономия тепловой энергии может быть получена от снижения количества пролетного пара в паро-конденсатной смеси, поступающей на узел сбора конденсата от потребителей технологического пара:

- за счет установки конденсатоотводчиков за теплообменниками Т-102, Т-103, Т-108, Т-212, Т-217;
- использование пара вторичного вскипания от Т-202 в технологическом цикле с повышением его давления на паровозжесторной установке и захолаживанием конденсата;
- установка теплообменника Т-105 для подогрева питательной воды теплом конденсата;
- за счет дополнительного захолаживания пароконденсатной смеси в кипятильниках ректификационных колонн при поддержании определенного уровня конденсата в межтрубном пространстве теплообменников Т-103, Т-102, что может обеспечить установка поплавковых конденсатоотводчиков с уравнивающей трубкой к паровому пространству кипятильника.

Дополнительную экономию тепловой энергии можно получить за счет улучшения теплоизоляции теплоиспользующего оборудования и трубопроводов, сокращения продувок и дренажей с паропроводов, за счет установки поплавковых конденсатоотводчиков на дренажах, за счет установки регуляторов температуры на теплоспутниках, использующих теплофикационную воду.

Как показали расчеты внедрение паро-эжекционной установки в технологическом цикле узла получения пара разбавления является экономически целесообразным и технически реализуемым решением. Модернизация схемы позволит полезно использовать пар вторичного вскипания, исключить из эксплуатации часть теплообменного оборудования, в частности теплообменник Т-1, что в свою очередь приведет к снижению эксплуатационных издержек.

Литература

1. Jing-Ming Chen, Biying Yu, Yi-Ming Wei, Energy technology roadmap for ethylene industry in China, Applied Energy, Volume 224, 2018, Pages 160-174.
2. Yongming Han, Hao Wu, Zhiqiang Geng, Qunxiong Zhu, Xiangbai Gu, Bin Yu, Review: Energy efficiency evaluation of complex petrochemical industries, Energy, Volume 203, 2020, 117893.
3. Amaral F, Santos A, Calixto E, Pessoa F, Santana D. Exergetic Evaluation of an Ethylene Refrigeration Cycle. Energies. 2020; 13(14):3753. <https://doi.org/10.3390/en13143753>
4. Shuguang Xiang, Lili Wang, Yinglong Wang, Rongshan Bi, Li Xia, Xiaoyan Sun, Exploration of gradient energy-saving separation processes for ethylene glycol mixtures based on energy, exergy, environment, and economic analyses, Separation and Purification Technology, Volume 279, 2021, 119787. doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119787

5. Anton A. Kiss, Robin Smith, Rethinking energy use in distillation processes for a more sustainable chemical industry, *Energy*, Volume 203, 2020, 117788. doi.org/10.1016/j.energy.2020.117788
6. Kentaro Hirata, Hiroyuki Kakiuchi, Energy saving for ethylene process by Adsorption Heat Pump, *Applied Thermal Engineering*, Volume 31, Issue 13, 2011, Pages 2115-2122. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.03.031
7. Система энерготехнологического комбинирования высокотемпературного участка дегидрирования изоамиленов в изопрен Бальзамов Д.С., Конахина И.А. Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2010. №1 (4). С. 16-25.
8. Термодинамический анализ системы сбора и повторного использования конденсата Конахина И.А., Конахин А.М., Шинкевич О.П. Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2011. №2. С. 11-14.
9. Левин М.С. Использование отработавшего и вторичного пара и конденсата. М.: Энергия, 1971.
10. Balzamor D., Akhmetova I., Bronskaya V., Kharitonova O., Balzamova E. Optimization of Thermal Conditions of Heat Recovery Boilers with Regenerative Heating in the High-Temperature Section of Isoamylene Dehydrogenation. *International Journal of Technology* 2020, 11(8), 1598-1607.
11. Система повторного использования парового конденсата нефтехимического предприятия в условиях его невозврата источнику / И. А. Конахина, А. М. Конахин, Э. А. Ахметов, А. И. Фазуллина // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2009. – № 5-6. – С. 18-25.
12. Zatsarinna Y., Logacheva A., Gainullin R., et al. Solution for renewable future// E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 124, p.04010.
13. Balzamor D.S., Balzamova E.Yu., Bronskaya V.V., Oykina G.I., Rybkina E.A., Shaikhetdinova R.S., Kharitonova O.S. The beneficial using the heat of the exhaust gases of the furnaces of the technological unit for the ethylene oxide production (2020) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020, 862(6), 062044. doi 10.1088/1757-899X/862/6/062044
14. Бальзамов Д.С. Сравнительный анализ двух способов энерготехнологического комбинирования высокотемпературного участка / Д. С. Бальзамов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2009. – № 3-4. – С. 151-156.
15. Зацаринная Ю. Н., Реутин Г. В., Курилов С.С., Исаева О.В., Ковалев Г.С. Прогнозирование выработки электроэнергии от ВИЭ методами машинного обучения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023.
16. Influence of Temperature on the Thermal Properties of the Core Material - the Coefficient of Temperature Conductivity, Specific Heat Capacity, Thermal Conductivity / E. Burlutsky, D. Balzamor, V. Bronskaya [et al.] // *International Journal of Technology*. – 2023. – Vol. 14, №. 2. – P. 443. – DOI 10.14716/ijtech.v14i2.6009.
17. Local Heat Transfer Dynamics in the In-Line Tube Bundle under Asymmetrical Pulsating Flow / A. Haibullina, A. Khairullin, D. Balzamor [et al.] // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, No. 15. – P. 5571. – DOI 10.3390/en15155571.
18. Temperature Dependence of the Kinetic Parameters of the Titanium–Magnesium Catalyzed Propylene Polymerization / V. Bronskaya, G. Manuyko, G. Aminova [et al.] // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14, No. 23. – P. 5183. – DOI 10.3390/polym14235183.

Авторы публикации

Бальзамов Денис Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений», Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3877-7643>. E-mail: dbalzamor@mail.ru

Бронская Вероника Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химической технологии», Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия. E-mail: dweronika@mail.ru

References

1. Jing-Ming Chen, Biying Yu, Yi-Ming Wei, Energy technology roadmap for ethylene industry in China, *Applied Energy*, Volume 224, 2018, Pages 160-174.
2. Yongming Han, Hao Wu, Zhiqiang Geng, Qunxiong Zhu, Xiangbai Gu, Bin Yu, Review: Energy efficiency evaluation of complex petrochemical industries, *Energy*, Volume 203, 2020, 117893.
3. Amaral F, Santos A, Calixto E, Pessoa F, Santana D. Exergetic Evaluation of an Ethylene Refrigeration Cycle. *Energies*. 2020; 13(14):3753. <https://doi.org/10.3390/en13143753>

4. Shuguang Xiang, Lili Wang, Yinglong Wang, Rongshan Bi, Li Xia, Xiaoyan Sun, Exploration of gradient energy-saving separation processes for ethylene glycol mixtures based on energy, exergy, environment, and economic analyses, Separation and Purification Technology, Volume 279, 2021, 119787. doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119787
5. Anton A. Kiss, Robin Smith, Rethinking energy use in distillation processes for a more sustainable chemical industry, Energy, Volume 203, 2020, 117788. doi.org/10.1016/j.energy.2020.117788
6. Kentaro Hirata, Hiroyuki Kakiuchi, Energy saving for ethylene process by Adsorption Heat Pump, Applied Thermal Engineering, Volume 31, Issue 13, 2011, Pages 2115-2122. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.03.031
7. Energy technology combination system for the high-temperature section of dehydrogenation of isoamylenes into isoprene Balzamov D.S., Konakhina I.A. Bulletin of the Kazan State Energy University. 2010. №. 1 (4). p. 16-25.
8. Thermodynamic analysis of a system for collecting and reusing condensate Konakhina I.A., Konakhin A.M., Shinkevich O.P. Bulletin of Ivanovo State Energy University. 2011. №. 2. p. 11–14.
9. Levin M.S. Use of exhaust and secondary steam and condensate. M.: Energy, 1971
10. Balzamov D., Akhmetova I., Bronskaya V., Kharitonova O., Balzamova E. Optimization of Thermal Conditions of Heat Recovery Boilers with Regenerative Heating in the High-Temperature Section of Isoamylene Dehydrogenation. International Journal of Technology 2020, 11(8), 1598-1607.
11. System for reusing steam condensate of a petrochemical enterprise in conditions of its non-return to the source / I. A. Konakhina, A. M. Konakhin, E. A. Akhmetov, A. I. Fazullina // News of higher educational institutions. Energy problems. – 2009. – №. 5-6. – P. 18-25.
12. Zatsarinnaya Y., Logacheva A., Gainullin R., et al. Solution for renewable future// E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 124, p.04010.
13. Balzamov D.S., Balzamova E.Yu., Bronskaya V.V., Oykina G.I., Rybkina E.A., Shaikhetdinova R.S., Kharitonova O.S. The beneficial using the heat of the exhaust gases of the furnaces of the technological unit for the ethylene oxide production (2020) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020, 862(6), 062044. doi 10.1088/1757-899X/862/6/062044
14. Balzamov D.S. Comparative analysis of two methods of energy-technological combination of high-temperature section / D. S. Balzamov // News of higher educational institutions. Energy problems. – 2009. – No. 3-4. – p. 151-156
15. Zatsarinnaya Yu. N., Reutin G. V., Kurilov S.S., Isaeva O.V., Kovalev G.S. Forecasting electricity generation from renewable energy sources using machine learning methods // News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS. 2023
16. Influence of Temperature on the Thermal Properties of the Core Material - the Coefficient of Temperature Conductivity, Specific Heat Capacity, Thermal Conductivity / E. Burlutsky, D. Balzamov, V. Bronskaya [et al.] // International Journal of Technology. – 2023. – Vol. 14, №. 2. – P. 443. – DOI 10.14716/ijtech.v14i2.6009.
17. Local Heat Transfer Dynamics in the In-Line Tube Bundle under Asymmetrical Pulsating Flow / A. Haibullina, A. Khairullin, D. Balzamov [et al.] // Energies. – 2022. – Vol. 15, No. 15. – P. 5571. – DOI 10.3390/en15155571.
18. Temperature Dependence of the Kinetic Parameters of the Titanium–Magnesium Catalyzed Propylene Polymerization / V. Bronskaya, G. Manuyko, G. Aminova [et al.] // Polymers. – 2022. – Vol. 14, No. 23. – P. 5183. – DOI 10.3390/polym14235183.

Authors of the publication

Denis S. Balzamov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E-mail: dbalzamov@mail.ru

Veronika V. Bronskaya – Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia. E-mail: dweronika@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено

15.11.2024 г.

Отредактировано

27.11.2024 г.

Принято

17.01.2025 г.



ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПРИ СБРОСЕ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ В НАЧАЛЬНОМ УЧАСТКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КАНАЛА

Гильфанов К.Х.¹, Гайнуллин Р.Н.², Ахмадеев У.М.¹, Гилязов Д.Р.³

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

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

³ООО «КЭР-Инжиниринг», г. Казань, Россия
kamil.gilfanov@yandex.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Исследование развития нестационарного теплового пограничного слоя турбулентного потока газа в начальном участке цилиндрического канала. МЕТОДЫ. Исследование выполнено экспериментально и путем математического моделирования. Опыты выполнены на стенде с плазменным подогревом рабочего тела (воздуха). Экспериментальный стенд представляет собой аэродинамическую трубу разомкнутого типа. Температура газа достигала до 1400 К, температура стенки повышалась до 700 К. Нестационарные условия реализуются при включении и выключении плазмотрона. При выключении электродугового нагревателя осуществлялся сброс тепловой нагрузки, приводящий к уменьшения температуры газа со скоростью по абсолютной величине до 5000 К/с и температуры стенки около 100 К/с. Профили температур потока измерены с помощью хромель-алюмелевых термопар. Математическая модель основывается на теории пограничного слоя с привлечением законов сопротивления и теплообмена на основе гипотезы Прандтля о длине пути смешения. Принимается двухслойная модель гидродинамического и теплового пограничных слоев. Использование параметрических методов расчета пограничного слоя Кутателадзе-Леонтьева позволяет получить соотношения для расчета профилей скорости и энтальпий. РЕЗУЛЬТАТЫ. Определено развитие интегральных толщин потока при сбросе тепловой нагрузки. Тепловая нестационарность при сбросе нагрузки по основному потоку деформирует профили температур, они становятся менее заполненными. Такая динамика вызывается ростом тепловой инерции термогазодинамической системы, блокированием потока тепловых волн в пограничный слой из-за падения фронта тепловой энергии с внешней стороны пограничного слоя. Термогазодинамическая система деформируется, отдавая энергию. Результатом подобных неуставившихся процессов является переход пограничного слоя к новому состоянию. Результаты обобщены в рамках теории пограничного слоя. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Толщина потери энергии увеличивается относительно своего стационарного изотермического аналога с ростом параметра тепловой нестационарности. Влияние нестационарности на толщину потери энергии лежит в пределах 20 % при $z_h \leq 2$, $Re_h^{**} = 1000$ и $Re^{**} = 1000$.

Ключевые слова: цилиндрический канал; высокотемпературный газ; тепловая нестационарность; толщины потери энергии; обобщение.

Для цитирования: Гильфанов К.Х., Гайнуллин Р.Н., Ахмадеев У.М., Гилязов Д.Р. Интегральные характеристики нестационарного теплового пограничного слоя при сбросе тепловой нагрузки в начальном участке цилиндрического канала // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 1. С. 116-125. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-116-125.

INTEGRAL CHARACTERISTICS OF A NON-STATIONARY THERMAL BOUNDARY LAYER AT THERMAL LOAD RELEASE IN THE INITIAL SECTION OF A CYLINDRICAL CHANNEL

Gilfanov K.H.¹, Gainullin R.N.², Akhmadeev U.M.¹, Gilyazov D.R.³

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

³LLC «KER-Engineering», Kazan, Russia

kamil.gilfanov@yandex.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* To study the development of a non-stationary thermal boundary layer of a turbulent gas flow in the initial section of a cylindrical channel. *METHODS.* The study was carried out experimentally and by means of mathematical modeling. The experiments were carried out on a rig with plasma heating of the working fluid (air). The experimental rig is an open-loop wind tunnel. The experiments were carried out at Reynolds numbers $Re_{01} = 44000$. The gas temperature reached 1400 K, the wall temperature increased to 700 K. The fixation of temperature fields in the boundary layer is carried out by means of chromel-alumel thermoelectric sensors. The mathematical model represents the integral equations of the boundary layer. The laws of turbulent exchange are obtained in accordance with the Prandtl model on the length of the mixing path. A two-layer model of hydrodynamic and thermal boundary layers is adopted. The use of parametric methods for calculating the boundary layer of Kutateladze-Leontiev allows us to obtain relationships for calculating the velocity and enthalpy profiles. The parameters at the boundary of the thermal conductivity sublayer, enthalpy profiles, and integral characteristics of the thermal boundary layer are determined numerically. Within the framework of the adopted model, the integral characteristics are a function of the thermal non-stationarity parameter caused by the time variability of flow temperatures. *RESULTS.* The development of integral flow thicknesses during the release of the thermal load is determined. Thermal non-stationarity during the release of the load along the main flow deforms the temperature profiles, they become less filled. The results are generalized within the framework of the boundary layer theory. *CONCLUSIONS.* The energy loss thickness increases relative to its stationary isothermal analog with an increase in the thermal non-stationarity parameter. The effect of non-stationarity on the energy loss thickness is within 20% at $z_h \leq 2$, $Re_h^{**} = 1000$ and $Re^{**} = 1000$.

Keywords: cylindrical channel; high-temperature gas; thermal non-stationarity; energy loss thickness; generalization.

For citation: Gilfanov K.H., Gainullin R.N., Akhmadeev U.M., Gilyazov D.R. Integral characteristics of a non-stationary thermal boundary layer at thermal load release in the initial section of a cylindrical channel. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (1): 116-125. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-116-125.

Введение (Introduction)

Работа многих энергетических установок характеризуется нестационарностью температур теплоносителя и обтекаемой поверхности. Нестационарность может быть обусловлена, как спецификой функционирования, так и переходными процессами при изменении режима работы [1-3]. Также создание переменных теплофизических условий потока является способом управления интенсивностью теплообмена. В таких ситуациях важным является знание тепловой структуры потока [4-6]. Научная и практическая значимость работы заключается в исследовании тепловой структуры потока, интегральных характеристик нестационарного пограничного слоя при сбросе тепловой нагрузки в начальном участке цилиндрического канала.

Каждому тепловому состоянию системы должно соответствовать свое распределение температур в пограничном слое. Тепловая нестационарность деформирует поля температур в пристенной области [7-9]. Изменение во времени тех или иных параметров, определяющих состояние системы, приводит к образованию нового пограничного слоя, определяющегося другими, отличными от «старого» параметрами. Развитие во времени и пространстве характеристик системы и вызывает различные отклонения параметров от своего стационарного значения. Для инженерных

расчетов необходима информация о временных и пространственных тепловых параметрах потока [10, 11].

Материалы и методы (Materials and methods)

В статье используется математическая модель на основе теории пограничного слоя. Принимается двухслойная модель гидродинамического и теплового пограничных слоев, состоящая пристенного вязкого подслоя, где влияние вязкости существенно и турбулентного ядра турбулентного пограничного слоя (ТПС). Во внешней области ТПС течение безвихревое (потенциальное), где влияние вязкости пренебрежимо мало. Предполагается, что тепловой пограничный слой также состоит из подслоя теплопроводности и конвективного ядра. Несмотря на свою малую толщину по сравнению с характерными внешними размерами обтекаемого тела, пограничный слой играет основную роль в гидродинамическом и тепловом взаимодействии потока с твердой поверхностью. В пограничном слое теплофизические параметры (скорости, температуры и концентрации) асимптотически приближаются к своим значениям в потенциальном потоке, что вносит неопределенность в определении толщины пограничного слоя. Общепринятым является подход, когда за толщину пограничного слоя принимается расстояние по нормали к поверхности, на котором величина теплофизического параметра отличается на 1 % от соответствующей величины во внешнем потоке. Такой подход является во многом условным, более объективным является использование интегральных толщин - вытеснения, потери импульса или энергии, поскольку они свободны от понятия толщины пограничного слоя, а определяются соответствующими функциональными профилями.

Для расчета подобного типа профилей необходимы законы сопротивления и теплоотдачи, для получения которых используются параметрические методы, предложенные С.С. Кутателадзе и А.И. Леонтьевым с привлечением модели пути смещения Прандтля [12, 13]:

Коэффициент теплоотдачи:

$$St = \frac{\int_{\omega_1}^1 \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} d\omega \int_{\vartheta_1}^1 \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} d\vartheta}{\int_{\xi_1}^1 \sqrt{\frac{\tau}{\tau_0}} \frac{d\xi}{\chi \xi} \int_{\xi_{1h}}^1 \frac{\bar{q}}{q_0} \sqrt{\frac{\tau_0}{\tau}} \frac{d\xi_h}{\chi \xi_h}}; \quad (1)$$

Энтальпия на границе подслоя теплопроводности:

$$\vartheta_1 = \text{PrRe}_h^{++} \frac{\delta}{\delta_h^{++}} St \xi_{1h} \left(1 + \frac{Z_h \xi_{1h}}{2} \right); \quad (2)$$

Толщина подслоя теплопроводности:

$$\xi_{1h} = \eta_{1h} \left[\text{Re}_h^{++} \frac{\delta}{\delta_h^{++}} \sqrt{St \left(1 + \frac{Z_h \xi_{1h}}{2} \right)} \right]^{-1}; \quad (3)$$

Профиль плотности:

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \varphi_h - (1 - \varphi_h) \vartheta \quad \text{или} \quad \frac{\rho}{\rho_0} = [\varphi_h - (1 - \varphi_h) \vartheta]^{-1}; \quad (4)$$

Безразмерная толщина потери тепловой энергии:

$$\frac{\delta_h^{++}}{\delta_h} = \int_0^1 \frac{\rho}{\rho_0} \omega (1 - \vartheta) (1 - \xi_h) d\xi_h; \quad (5)$$

Профиль безразмерных касательных напряжений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\bar{\tau}}{\tau_0} &= 1 + \frac{\bar{\tau}'_w \xi}{1 + 2\xi}, \text{ при } \tau'_w = \frac{\partial \tau_w}{\partial \xi} \geq 0; \\ \frac{\bar{\tau}}{\tau_0} &= 1 + \frac{(1 + \bar{\tau}'_w) \xi}{1 - \xi} - \frac{(1 + \bar{\tau}'_w) \xi^d}{1 - \xi}, d = \frac{\bar{\tau}'_w}{1 + \bar{\tau}'_w}, \text{ при } \bar{\tau}'_w = \frac{\partial \tau_w}{\partial \xi} < -1 \end{aligned} \right\}; \quad (6)$$

Профиль безразмерных тепловых потоков:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\bar{q}}{q_0} &= 1 + \frac{q'_w \xi_h}{1 + 2\xi_h}, \text{ при } \bar{q}'_w = \frac{\partial \bar{q}_w}{\partial \xi_h} \geq 0; \\ \frac{\bar{q}}{q_0} &= 1 + \frac{(1 + q'_w) \xi_h}{1 - \xi_h} - \frac{(1 + q'_w) \xi_h^{d_h}}{1 - \xi_h}, \quad d_h = \frac{q'_w}{1 + q'_w}, \text{ при } \bar{q}'_w = \frac{\partial \bar{q}_w}{\partial \xi_h} < -1 \end{aligned} \right\}; \quad (7)$$

Производная от тепловых потоков:

$$\bar{q}'_w = \frac{\partial \bar{q}_w}{\partial \xi_h} = z_h + \lambda_h - \frac{\delta_h}{r_0}; \quad (8)$$

Профиль энтальпий:

$$\vartheta_i = 1 - \text{St} \sqrt{\frac{2}{C_f}} \int_{\xi_{hi}}^1 \frac{\bar{q}}{q_0} \sqrt{\frac{\tau_0}{\tau}} \frac{d\xi_h}{\chi \xi_h} - \frac{1 - \varphi_h}{4} \left(\text{St} \sqrt{\frac{2}{C_f}} \int_{\xi_{hi}}^1 \frac{\bar{q}}{q_0} \sqrt{\frac{\tau_0}{\tau}} \frac{d\xi_h}{\chi \xi_h} \right)^2. \quad (9)$$

В (1) $\chi = 0,4$ – константа турбулентности (постоянная Кармана).

$\text{Re}_h^{**} = \frac{\rho_0 w_0 \delta_h^{**}}{\mu_0}$ – характерное число Рейнольдса по толщине потери энергии

теплового пограничного слоя.

Толщина подслоя теплопроводности (3) определяется численно, итерационным методом. Безразмерная толщина потери тепловой энергии (5) интегрируется методом Гаусса по профилю энтальпий (9).

В рамках принятой модели, согласно формуле (9), интегральные характеристики являются функцией тепловой нестационарности, обусловленной временной переменностью температур потока и обтекаемой поверхности и температурной неоднородностью $\psi_h = h_w/h_0^*$. На рисунке 1 представлена зависимость толщин потери энергии отнесенные к стационарным аналогам от параметра тепловой нестационарности.

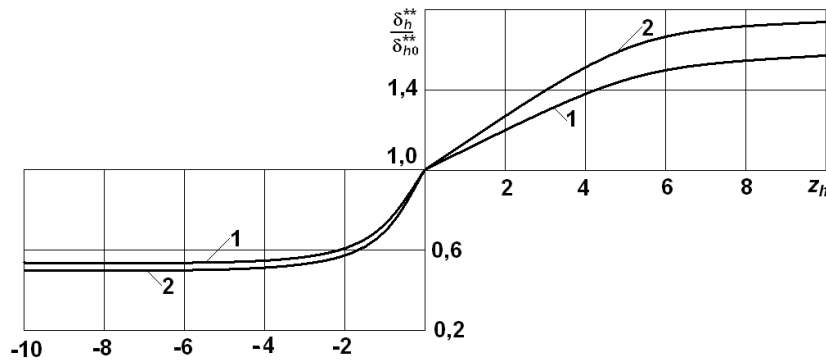


Рис. 1. Влияние тепловой нестационарности на относительные толщины потери энергии теплового пограничного слоя:

1 – $\text{Re}_h^{**}=400$; $\text{Re}^{**}=1000$; $z=0$;
2 – $\text{Re}_h^{**}=3000$; $\text{Re}^{**}=1000$; $z=0$

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

Fig. 1. Effect of thermal unsteadiness on the relative energy loss thicknesses of the thermal boundary layer:

1 – $\text{Re}_h^{**}=400$; $\text{Re}^{**}=1000$; $z=0$;
2 – $\text{Re}_h^{**}=3000$; $\text{Re}^{**}=1000$; $z=0$

Экспериментальный стенд. Для выполнения исследований по определению интегральных характеристик в условиях тепловой нестационарности была разработана экспериментальная установка на основе аэродинамической трубы разомкнутого типа с электродуговым плазмотроном, подробное описание которой представлено в работе [13].

Для создания нестационарных условий во время проведения экспериментов осуществлялось попеременное включение и выключение плазмотрона при неизменном массовом расходе рабочего тела. Включение плазмотрона моделирует пуск, а выключение – останов энергетической установки. При этом активная фаза работы плазмотрона составляла примерно 2 секунды. Выбор данного временного интервала режима активной работы плазмотрона был обусловлен, прежде всего, необходимостью

защиты датчиков температуры от перегрева и разрушения, сохранностью работоспособности датчиков температуры, которые, при более длительном времени его работы могли выйти из строя.

На рисунке 2 представлено временные и пространственные тренды температур потока и стенки, полученные при включении и выключении источника энергии.

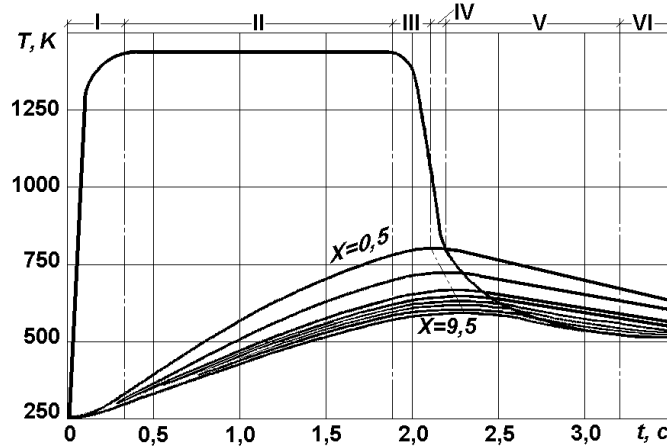


Рис. 2. Диаграмма температур основного потока и обтекаемой поверхности по времени и продольной координате

Fig. 2. Temperature diagram of the main flow and streamlined surface by time and longitudinal coordinate

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

После отключения источника энергии происходит постепенное снижение уровня температур как основного потока рабочего тела, так и стенки. На рисунке 2 этот временной интервал, который также называется участком сброса тепловой нагрузки, обозначен промежутком времени IV.

Деформация профиля температур в нестационарных условиях вызывается в основном знаком и абсолютной величиной параметра тепловой нестационарности z_h . Данная величина является весьма удобной для оценки эффектов нестационарности в теории пограничного слоя [12, 13]:

$$z_h = \frac{\delta_h}{St\psi_h w_0 (h_0^* - h_w)} \frac{\partial (h_0^* - h_w)}{\partial t}.$$

Значительный научный и практический интерес представляет ситуация, когда имеет место нестационарность, связанная с уменьшением температуры теплоносителя. В такой обстановке возможна перемена направления теплового потока, следовательно, изменение направления действия неизотермичности, оцениваемой энтальпийным фактором ψ_h .

Результаты (Results)

При сбросе тепловой нагрузки по основному потоку рабочего тела параметр тепловой нестационарности z_h имеет положительный знак и наибольшую абсолютную величину в начальные после выключения плазматрона моменты времени. Это связано с максимальной скоростью снижения температурного напора. Согласно анализу в рамках теории [13] положительным параметрам тепловой нестационарности z_h должны соответствовать менее заполненные поля температур (энтальпий). Такая динамика влияния вызывается ростом тепловой инерции термогазодинамической системы, блокированием потока тепловых волн в пограничный слой из-за падения фронта тепловой энергии с внешней стороны пограничного слоя. Термогазодинамическая система деформируется, отдавая энергию. Результатом таких неустановившихся процессов является переход пограничного слоя к новому состоянию. Обратная ситуация происходит при набросе тепловой нагрузки (участок I на рис. 2). Пограничный слой в данном случае поглощает возрастающую энергию основного потока, соответственно параметр тепловой нестационарности z_h отрицателен.

Опыты проводились при числах Рейнольдса $Re_{01} = 44000$. В качестве рабочего тела использовался воздух. Для достижения оптимальных условий эксперимента по определению характеристик пограничного слоя при сбросе тепловой нагрузки время активной работы плазматрона устанавливалось около 2 секунд. Основной поток в таких условиях нагревался до 1400 К, Температура стенки повышалась до 700 К. При выключении электродугового нагревателя осуществлялся сброс тепловой нагрузки,

который приводил к уменьшения температуры газа со скоростью по абсолютной величине до 5000 К/с. Температура основного потока, уменьшаясь, становилась меньше температуры стенки, тем самым осуществлялась перемена направления фактора неизомермичности ψ_h . После выключения плазмотрона температура стенки некоторое время продолжала расти, затем постоянно уменьшалась. Скорость уменьшения температуры стенки составляла около 100 К/с.

Измерение профилей температур проводилось посредством термопарной гребенки, устанавливаемой на опытном цилиндрическом канале диаметром 45 мм (рис. 3). Трудности измерения температур в условиях эксперимента связаны с динамическими характеристиками термопар [14-16]. Рабочие концы ХА термопар 0,02 мм установлены расстоянии 0,2; 0,5; 1,2; 2,0; 3,6; 6,3; 10,0; 14,0; 18,0; 22,5 мм от стенки. Термопарная гребенка устанавливалась на расстоянии $X=10,5$ калибров от входа. Постоянные времени термопар уменьшены до 0,003 с путем введения в измерительную цепь активного RC-звена. Выходные сигналы термопар подавались в измерительно-вычислительный комплекс.

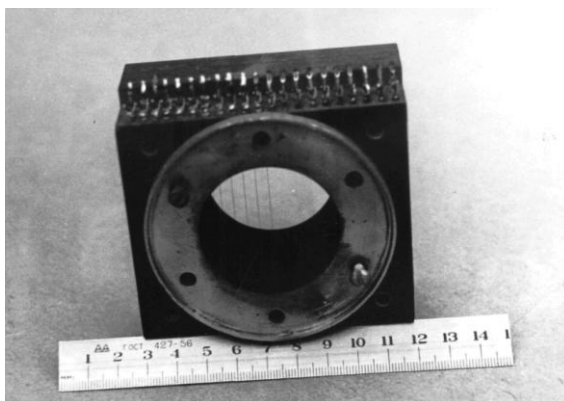


Рис. 3. Термопарная гребенка

Fig. 3. Thermocouple comb

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

Обсуждение (Discussions)

Значения, полученные в результате измерений, использовались для построения следующих размерных (рис. 4) и безразмерных профилей температур (рис. 5):

$$T=f(y),$$

$$\theta = \frac{T - T_w}{T_0 - T_w} = \varphi(y, t).$$

На графике рисунка 4 можно наблюдать «переворот» теплового пограничного слоя в момент времени 2,96 с в процессе уменьшения температуры основного потока. Данная временная точка характеризуется качественным изменением теплоотдачи, тепловой поток направляется от стенки к газу.

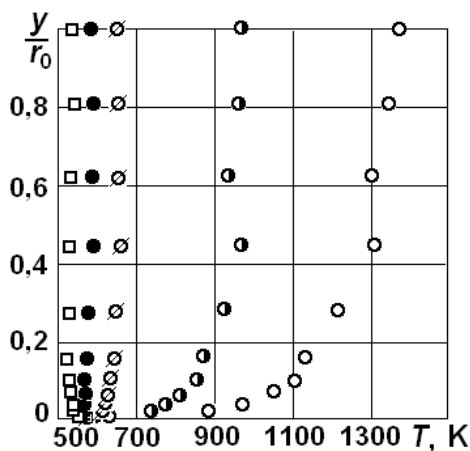


Рис. 4. Профиль температур при сбросе тепловой нагрузки:

Fig. 4. Temperature profile during heat load shedding:

○ – 2 с; ● – 2,12 с; ◻ – 2,6 с; ● – 2,96 с; ◻ – 3,44 с

○ – 2 с; ● – 2,12 с; ◻ – 2,6 с; ● – 2,96 с; ◻ – 3,44 с

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

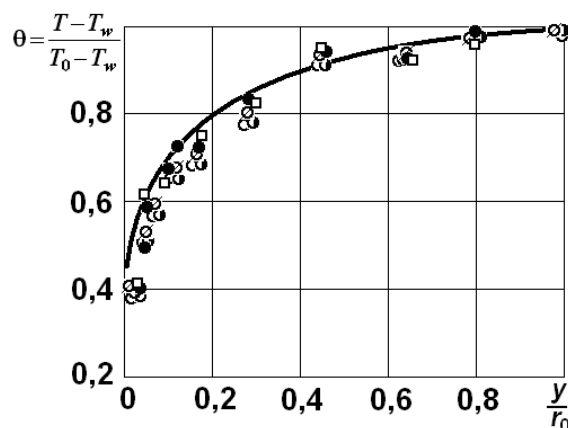


Рис. 5. Безразмерные профили температур при сбросе тепловой нагрузки температуры стенки. Временные точки по рис. 4.

Fig. 5. Dimensionless temperature profiles during wall temperature heat load shedding. Time points from Fig. 4.

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

Разброс точек связан с неопределенностью результата измерений температуры (погрешность по газу 0,9%, по стенке 4,0%). Анализ графиков на рисунках 4-5 позволяет констатировать меньшую заполненность профиля температур в начальные моменты времени. Примечательно, что в окрестности малых температурных напоров $\Delta t = T_0 - T_w$ отклонение результатов от расчетных значительно возрастает. Это связано с повышением относительной погрешности, так как абсолютная погрешность измерения температуры становится соразмерной с разностью температур Δt .

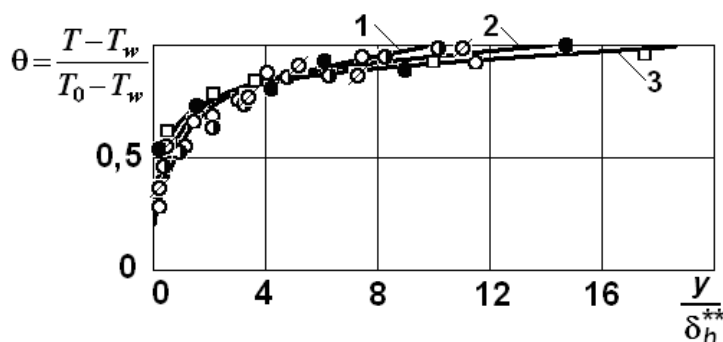


Рис. 6. Влияние тепловой нестационарности на профиль температур:

○ – 2 с; ● – 2,3 с; ◐ – 2,6 с; ● – 2,96 с; □ – 3,08 с.

Линии – расчет:

1 – $z_h=2$; $\psi_h=0,4$; $Re_h^{**}=800$;

2 – $z_h=0,5$; $\psi_h=1,0$; $Re_h^{**}=800$;

3 – $z_h=0$; $\psi_h=1,0$; $Re_h^{**}=2000$

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

Fig. 6. Effect of thermal unsteadiness on the temperature profile:

○ – 2 с; ● – 2,3 с; ◐ – 2,6 с; ● – 2,96 с; □ – 3,08 с.

Lines – Calculation:

1 – $z_h=2$; $\psi_h=0,4$; $Re_h^{**}=800$;

2 – $z_h=0,5$; $\psi_h=1,0$; $Re_h^{**}=800$;

3 – $z_h=0$; $\psi_h=1,0$; $Re_h^{**}=2000$

Определение толщины пограничного слоя всегда вызывает неоднозначность оценки, в то же время интегральные толщины пограничного слоя свободны от этого недостатка, что позволяет более наглядно обработать и представить результаты в координатах $\theta = \theta(y/\delta_h^{**})$. Толщина потери энергии вычисляется с учетом существенной неизотермичности и температурной неоднородности, и как следствие, неравномерной плотности. Результаты такой интерпретации и обработки данных для разных характерных чисел Рейнольдса представлены на рисунке 6. Линии рассчитаны по формулам (4-5) для условий, соответствующих эксперименту.

Увеличение параметра тепловой нестационарности приводит к меньшей заполненности профиля температур, причем повышение числа Рейнольдса снижает эту зависимость, ввиду повышения устойчивости пограничного слоя.

Зависимость относительной толщины потери энергии от параметра тепловой нестационарности при гидродинамическом числе Рейнольдса $Re^{**}=1000$ представлена на рисунке 7. Значения толщин потери энергии δ_h^{**} находились из расчета согласно [7].

Влияние температурной неоднородности учитывалось аналогично рисунку 6. Также приведены расчетные по методике [13] зависимости для соответствующих значений теплового и гидродинамического характерных чисел Рейнольдса.

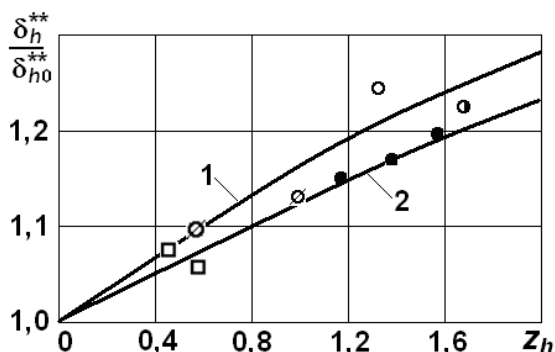


Рис. 7. Относительные толщины потери энергии в функции тепловой нестационарности:

Точки – эксперимент ○ – 2,03 с; ● – 2,06 с; □ – 2,36 с; ■ – 2,12 с; □ – 2,45 с.

Линии – расчет:

1 – $Re_h^{**}=2000; Re^{**}=1000$

2 – $Re_h^{**}=500; Re^{**}=1000$

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

Fig. 7. Relative thicknesses of energy loss as a function of thermal unsteadiness:

Points – experiment ○ – 2,03 с; ● – 2,06 с; □ – 2,36 с; ■ – 2,12 с; □ – 2,45 с.

Lines – Calculation:

1 – $Re_h^{**}=2000; Re^{**}=1000$

2 – $Re_h^{**}=500; Re^{**}=1000$

Выводы (Conclusions)

Тепловая нестационарность при сбросе нагрузки по основному потоку деформирует профили температур, они становятся менее заполненными. Толщина потери энергии увеличивается относительно своего стационарного изотермического аналога с ростом параметра тепловой нестационарности. Влияние нестационарности на толщину потери энергии лежит в пределах 20% при $z_h \leq 2$, $Re_h^{**}=1000$ и $Re^{**}=1000$. Опытные данные количественно и качественно удовлетворительно согласуются с аналитическими расчетными результатами.

Обозначения:

St – число Стантона; w_0 – скорость основного потока, м/с; δ_h – толщина теплового пограничного слоя, м; $\psi_h = h_w/h_0^*$ – энтальпийный фактор; h – энтальпия, Дж/кг; λ_h – параметр продольного градиента энтальпии, Re^{**} – число Рейнольдса, построенное по толщине потери импульса; Re_h^{**} – число Рейнольдса, построенное по толщине потери энергии теплового пограничного слоя; t – время, с;

индексы: $_0$ – параметры основного потока, параметр в стационарных условиях; $_w$ – параметры на стенке, $_h$ – тепловой; $*$ – параметр торможения.

Литература

1. Попов И.А., Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В. Промышленное применение интенсификации теплообмена - современное состояние проблемы (обзор) // Теплоэнергетика. 2012. № 1. С. 3-17.
2. Щукин А.В. и др. Теплофизика рабочих процессов в охлаждаемых лопатках газовых турбин // Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2020. 392 с.
3. Гильфанов К.Х., Шакиров Р.А., Гайнуллин Р.Н., Коннов Ф.В. Способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования / Вестник Казанского государственного энергетического университета. Казань, КГЭУ, 2022, № 4 (55). -С. 80-91.
4. Якимов Н.Д., Шагеев А.Ф., Дмитриев А.В., Бадретдинова Г.Р. Особенности расчета температурного поля в кольцевом пористом слое при бесконечном нагреве / Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023;25(6):54-66. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-6-54-66>
5. Plotnikov L. V. Experimental Assessment of Flow Structure in a Cylinder During Air Flow Through Poppet Valves of Different Configurations / Journal of Engineering Physics and Thermophysics. Published: 22 February 2024 Volume 97, pages 172–178, (2024)
6. Kornilov V. I., Shkvar E. A., Popkov A. N. Influence of Distributed Blowing-In on a Turbulent Boundary Layer on a Body of Revolution / Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 14 February 2022, Volume 95, pages 132–141

7. Shchukin A.V. Film Cooling Efficiency on a Convex or Flat Surface in Conditions of Pulsed Blowing through Fan-Shaped and Cylindrical Holes / A.V. Il'inkov, A.V. Shchukin, V.V. Takmoltsev, and A.V. Starodumov // Russian Aeronautics. – 2024. – Vol. 67. – № 3. – Pp. 309-314.
8. Shchukin A.V. Efficiency of a Heat Air Shield in the Case of Pulsed Blowing through a Slot at an Angle of 30 Degree / A.V. Il'inkov, V.V. Takmoltsev, A.V. Starodumov A.V. Shchukin, and A.L. Tukmakov// Russian Aeronautics. – 2024. – Vol. 67. – № 2. – Pp. 386 - 392.
9. Tukmakov A.L. Model of Convective-Film Cooling of Plate with Flow Non-Stationarity and Gas Compressibility / A.L. Tukmakov, A.A. Akhunov, N.A. Tukmakova, and V.V. Khar'kov // Russian Aeronautics. – 2024. – Vol. 67. – № 1. – Pp. 110 - 118.
10. Tan, B., Cai, J., Zhao, J., Hibiki, T., Tian, W. X. & Wu, Y. W. Experimental and theoretical study of vapor/air mixture condensation inside an inclined blind-end pipe in natural convection with considering fog formation / International Journal of Heat and Mass Transfer. 184, 122375, Mar 2022, In: DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122375](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122375)
11. Pavlyukevich N. V., Shnip A. I. Modeling Heat Transfer in the Core of a Nuclear Power Reactor in the Presence of Perturbations of Hydrodynamic and Energy Parameters / Journal of Engineering Physics and Thermophysics. Published: 14 February 2022 Volume 95, pages 29–36.
12. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое // -М.: Энергоатомиздат, 1985. -320 с.
13. Гильфанов К.Х., Якимов Н.Д., Минвалеев Н.Ю., Шешуков Е.Г., Богданова Н.В. Нестационарные трение и теплообмен в начальном участке трубопровода при сбросе тепловой нагрузки / Изв. вузов. Проблемы энергетики, 2018, Т. 20 № 5-6, С. 22-28.
14. Володин Ю.Г., Гильфанов К.Х., Марфина О.П., Закиров И.Ф., Казаков А.А., Кузнецов А.Б., Рыжакова Ж.С. Экспериментальное исследование тепловой инерции микротермопар / Приборы. –2008. – № 4. – С. 52 – 55.
15. Гильфанов К.Х., Подымов В.Н., Минвалеев Н.Ю., Сибгатуллин И.Ф., Гайнуллин Р.Н. Амплитудно-фазовые частотные характеристики гидродинамических и тепловых параметров в коротком цилиндрическом канале / Изв. вузов. Проблемы энергетики, 2014, № 11-12, С. 81-88.
16. Бадретдинова Г.Р., Калимуллин И.Р., Зинуров В.Э., Дмитриев А.В. Оценка моделей турбулентности при внешнем обтекании нагреваемой трубы / Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023;25(2):176-186. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-2-176-186>.

Авторы публикации

Гильфанов Камиль Хабибович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. E-mail: kamil.gilfanov@yandex.ru

Гайнуллин Рустем Нусратуллович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизированные системы сбора и обработки информации» Казанского национального исследовательского технологического университета, г. Казань, Россия. E-mail: gainullin@kstu.ru

Ахмадеев Урал Мансурович – аспирант Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. E-mail: ural.akhmadeev@mail.ru

Гилязов Дамир Рауфович – главный инженер проекта ООО «КЭР-Инжиниринг», г. Казань, Россия. E-mail: damir_gilyazov@mail.ru

References

1. Popov I.A., Gortyshov Yu.F., Olympiev V.V. Industrial application of heat transfer intensification - the current state of the problem (review) // Teploenergetika. 2012. No. 1. pp. 3-17.
2. Shchukin A.V. et al. Thermophysics of working processes in cooled blades of gas turbines // Kazan: Publishing house of KNITU-KAI, 2020. 392 p.
3. Gilfanov K.H., Shakirov R.A., Gainullin R.N., Konnov F.V. Method of heat transfer intensification based on intelligent control of the operating characteristics of heat exchange equipment / Bulletin of the Kazan State Energy University. Kazan, KGEU, 2022, No. 4 (55). pp. 80-91.
4. Yakimov N.D., Shageev A.F., Dmitriev A.V., Badretdinova G.R. Features of calculating the temperature field in an annular porous layer under infinite heating / News of Higher educational institutions. Energy problems. 2023;25(6):54-66. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-6-54-66>
5. Plotnikov L. V. Experimental Assessment of Flow Structure in a Cylinder During Air Flow

Through Poppet Valves of Different Configurations / Journal of Engineering Physics and Thermophysics. Published: 22 February 2024 Volume 97, pages 172–178, (2024)

6. Kornilov V. I., Shkvar E. A., Popkov A. N. Influence of Distributed Blowing-In on a Turbulent Boundary Layer on a Body of Revolution / Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 14 February 2022, Volume 95, pages 132–141

7. Shchukin A.V. Film Cooling Efficiency on a Convex or Flat Surface in Conditions of Pulsed Blowing through Fan-Shaped and Cylindrical Holes / A.V. Il'inkov, A.V. Shchukin, V.V. Takmoltsev, and A.V. Starodumov // Russian Aeronautics. – 2024. – Vol. 67. – № 3. – Pp. 309-314.

8. Shchukin A.V. Efficiency of a Heat Air Shield in the Case of Pulsed Blowing through a Slot at an Angle of 30 Degree / A.V. Il'inkov, V.V. Takmoltsev, A.V. Starodumov A.V. Shchukin, and A.L. Tukmakov// Russian Aeronautics. – 2024. – Vol. 67. – № 2. – Pp. 386 - 392.

9. Tukmakov A.L. Model of Convective-Film Cooling of Plate with Flow Non-Stationarity and Gas Compatibility / A.L. Tukmakov, A.A. Akhunov, N.A. Tukmakova, and V.V. Khar'kov // Russian Aeronautics. – 2024. – Vol. 67. – No. 1. – Pp. 110 - 118.

10. Tan, B., Cai, J., Zhao, J., Hibiki, T., Tian, W. X. & Wu, Y. W. Experimental and theoretical study of vapor/air mixture condensation inside an enclosed blind-end pipe in natural convection with considering fog formation / International Journal of Heat and Mass Transfer. 184, 122375, Mar 2022, In: DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122375

11. Pavlyukevich N. V., Shnip A. I. Modeling Heat Transfer in the Core of a Nuclear Power Reactor in the Presence of Perturbations of Hydrodynamic and Energy Parameters / Journal of Engineering Physics and Thermophysics. Published: 14 February 2022 Volume 95, pages 29-36.

12. Kutateladze S.S., Leontiev A.I. Heat and Mass transfer and friction in a turbulent boundary layer // -M.: Energoatomizdat, 1985. -320 p.

13. Gilfanov K.Kh., Yakimov N.D., Minvaleev N.Yu., Sheshukov E.G., Bogdanova N.V. Unsteady friction and heat transfer in the initial section of the pipeline during heat load discharge / Izv. vuzov. Problems of Energy, 2018, Vol. 20 No. 5-6, pp. 22-28.

14. Volodin Yu.G., Gilfanov K.H., Marfina O.P., Zakirov I.F., Kazakov A.A., Kuznetsov A.B., Ryzhakova J.S. Experimental study of thermal inertia of microthermoparks / Devices. -2008. – No. 4. – pp. 52-55.

15. Gilfanov K.H., Podymov V.N., Minvaleev N.Yu., Sibgatullin I.F., Gainullin R.N. Amplitude-phase frequency characteristics of hydrodynamic and thermal parameters in a short cylindrical channel / Izv. vuzov. Problems of Energy, 2014, No. 11-12, pp. 81-88.

16. Badretdinova G.R., Kalimullin I.R., Zinurov V.E., Dmitriev A.V. Evaluation of turbulence models in the external flow of a heated pipe / News of higher educational institutions. Energy problems. 2023;25(2):176-186. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-2-176-186>

Authors of the publication

Kamil H. Gilfanov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E-mail: kamil.gilfanov@yandex.ru

Rustem N. Gainullin – Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia. E-mail: gainullin@kstu.ru

Ural M. Akhmadeev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E-mail: ural.akhmadeev@mail.ru

Damir R. Gilyazov – «KER-Engineering LLC», Kazan, Russia. E-mail: damir_gilyazov@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено 10.12.2024 г.

Отредактировано 28.12.2024 г.

Принято 27.01.2025 г.



ПОЛИКАНАЛЬНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗДЕЛЕНИЯ ЖИДКИХ АЭРОЗОЛЬНЫХ СИСТЕМ В НАСАДОЧНЫХ СКРУББЕРАХ-ОХЛАДИТЕЛЯХ

Лаптева Е.А., Аласгарли С.У.О., Клочкова В.А.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

grivka100@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в полученной математической модели расчета эффективности разделения аэрозольных систем, которая учитывает неравномерный профиль скорости газа в насадочном газосепараторе-скруббере. ЦЕЛЬЮ является на основе разработанной математической модели создание инженерной методики расчета эффективности насадочных скрубберов-охладителей совместно с разделением аэрозолей с привлечением данных по гидравлическому сопротивлению локальных зон слоя хаотичной насадки и неравномерного профиля скорости газа. МЕТОДЫ заключаются в применении дифференциального уравнения массопереноса аэрозольных частиц с локальным объемным источником массы переноса и осаждения частиц на поверхность хаотичной насадки. Для этого используется теория турбулентно-инерционного механизма осаждения частиц при больших скоростях движения аэрозольных систем. Объемный источник массы связан с коэффициентом скорости турбулентной миграции частиц, разностью концентраций и с удельной поверхностью насадки. Уравнение массопереноса частиц записано в одномерной постановке для ряда параллельных условных каналов насадочного слоя с различной скоростью движения газа. Научная новизна состоит в математической модели сепарации аэрозолей, которая с небольшими вычислительными затратами позволяет прогнозировать влияние неоднородности размещения насадки и неравномерность профиля скорости газа на эффективность процесса разделения. РЕЗУЛЬТАТАМИ является установленное влияние неравномерного профиля скорости газа в насадочном слое на профиль концентрации частиц и на эффективность сепарации аэрозолей, что очень важно при проектировании или модернизации скрубберов-охладителей. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В результате применения разработанной математической модели и методики расчетов выявлено влияние различной скорости газа в хаотичном насадочном слое на эффективность разделения аэрозольных систем. Показано, что наличие неравномерностей снижает эффективность разделения на 5-33%, что необходимо учитывать при проектировании контактных скрубберов с насадками при очистке газа от дисперсной фазы на предприятиях топливно-энергетического комплекса.

Ключевые слова: разделение аэрозолей; математическая модель; турбулентная миграция; неравномерность скорости газа; эффективность разделения.

Благодарности: Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

Для цитирования: Лаптева Е.А., Аласгарли С.У.О., Клочкова В.А. Поликанальная математическая модель разделения жидких аэрозольных систем в насадочных скрубберах-охладителях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 1. С. 126-138. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-126-138.

MULTICHANNEL MATHEMATICAL MODEL OF SEPARATION OF LIQUID AEROSOL SYSTEMS IN PACKED SCRUBBER-COOLERS

Lapteva E.A., Alasgarli S.U.O., Klochkova V.A.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
grivka100@mail.ru

Abstract: *THE RELEVANCE* of the study lies in the obtained mathematical model for calculating the efficiency of separation of aerosol systems, which takes into account the uneven profile of the gas velocity in the nozzle gas separator-scrubber. *THE PURPOSE* is, based on the developed mathematical model, to create an engineering methodology for calculating the efficiency of nozzle scrubber coolers together with aerosol separation using data on the hydraulic resistance of local zones of the chaotic nozzle layer and an uneven gas velocity profile. *METHODS* consist in the application of a differential equation of mass transfer of aerosol particles with a local volumetric source of mass transfer and deposition of particles on the surface of a chaotic nozzle. For this purpose, the theory of the turbulent inertial mechanism of particle deposition at high velocities of aerosol systems is used. The volumetric mass source is related to the coefficient of the turbulent particle migration rate, the concentration difference and the specific surface area of the nozzle. The equation of mass transfer of particles is written in a one-dimensional formulation for a number of parallel conditional channels of the packing layer with different gas velocity. The scientific novelty consists in a mathematical model of aerosol separation, which, with low computational costs, makes it possible to predict the effect of inhomogeneity of nozzle placement and uneven gas velocity profile on the efficiency of the separation process. *RESULTS* are the established effect of the uneven gas velocity profile in the packing layer on the particle concentration profile and on the efficiency of aerosol separation, which is very important when designing or upgrading scrubber coolers. *CONCLUSION.* As a result of the application of the developed mathematical model and calculation methodology, the influence of different gas velocities in a chaotic packing layer on the separation efficiency of aerosol systems has been revealed. It is shown that the presence of irregularities reduces the separation efficiency by 5-33%, which must be taken into account when designing contact scrubbers with nozzles for gas purification from the dispersed phase at enterprises of the fuel and energy complex.

Keywords: aerosol separation; mathematical model; turbulent migration; uneven gas velocity; separation efficiency.

Acknowledgments: The work was carried out at the expense of a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, provided to young candidates of science (postdoctoral students) for the purpose of defending a doctoral dissertation, carrying out research work, and also performing work functions in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan within the framework of the State Program of the Republic of Tatarstan "Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan".

For citation: Lapteva E.A., Alasgarli S.U.O., Klochkova V.A. Multichannel mathematical model of separation of liquid aerosol systems in packed scrubber-coolers. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (1): 126-138. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-126-138.

Введение (Introduction)

Задачи охлаждения и очистки газов от различного вида дисперсной фазы актуальны для предприятий нефтегазохимического комплекса и энергетики. Тепломассообменные аппараты, технологические установки и компрессорные станции не могут работать без эффективных газосепараторов (скрубберах). Применяются скрубберы «мокрой» очистки и охлаждения газов различных конструкций – Вентуры, барботажные, насадочные, ударно-распылительные и другие. Выбор типа аппарата зависит от решаемой технологической задачи и требований к газоочистке. Охлаждаемыми и очищаемыми газами могут дымовые на тепловых станциях или технологические газы на промышленных предприятиях ТЭК. Например, на узлах компримирования газа в процессе работы компрессоров образуются масляные аэрозоли

(масляный туман). Капли таких аэрозолей имеют размеры 0,5-20 мкм. Жидкие аэрозольные системы эффективно разделяются в аппаратах с различными контактными элементами – регулярными и нерегулярными (хаотичными) насадками. Известно многие сотни различных насадочных элементов и важной задачей является выбор рациональной конструкции, которая обеспечивает заданную степень очистки при ограничениях по энергозатратам. Эффективными инструментами решения таких задач являются математическое моделирование и экспериментальные исследования процесса сепарации аэрозолей.

1. Анализ современного состояния. Теоретические основы физического и математического моделирования тепломассообменных и сепарационных процессов и модернизации аппаратов были сформулированы и развиты в многочисленных работах академиков АН СССР Жаворонкова Н.М., Кафарова В.В., Кутателадзе С.С., Леонтьева А.И., академиками РАН Мешалкиным В.П., Алексеенко С.В., а так же профессорами Плановским А.Н., Касаткиным А.Г., Малюсовым В.А., Куловым Н.Н., Комиссаровым Ю.А., Кутеповым А.М., Дильманом В.В., Розеном А.М., Николаевым А.Н., Холпановым Л.П., Дьяконовым С.Г., Медниковым В.П., Систером В.Г., Саркисовым П.Д., Павленко А.Н., зарубежными учеными: Э.Ф. Тейлором, Данквертсом П.В., Р.Х. Jiang, S. Gurke, Хьюит Дж., Холландом Ч.Д. и многими другими. Некоторые современные работы анализируются ниже.

В работе [1] показано применение комбинированных контактных устройств для охлаждения дымовых газов, однако не решается задача очистки газов от продуктов сгорания. Тепломассообмен при контакте газа с пленкой жидкости рассмотрен в работе [2], где также нет решений по очистке газов от аэрозольных частиц. Разработаны способы [3] охлаждения газа с ресурсосберегающим эффектом, однако это не относится к дымовым газам. Представляет интерес результаты исследований [4] гидродинамических характеристик струйного массообменного аппарата, который может применяться при решении задач тепломассообмена и сепарации аэрозолей. Рекуперации теплоты продуктов сгорания природного газа при контакте с жидкой фазой с методикой расчета аппарата представлена в работе [5], без решения проблемы очистки газа. Технологические схемы охлаждения коксового газа даны в работе [6].

Обзорная статья [7] по развитию аппаратов очистки газов от пыли представляет интерес при разработке новых конструкций контактных устройств. Совместные процессы очистки дымовых газов от оксиды азота и угольной пыли даны в статье [8], где рассмотрено применение «мокрых» насадочных скрубберов, однако без решения тепловой задачи. Похожие задачи очистки газов обсуждаются в обзорной статье [9], а также в работе [10].

В работе [11] представлена кинетика сепарации и численный анализ профилей концентраций газовых конденсатов. Численное исследование параметров дисперсной фазы при распылительной сушке дано в работе [12]. Моделирование с использованием программного комплекса вычислительной гидродинамики для газоразделения показано в работе [13]. Обзорное исследование по разделению газожидкостных систем с подробным анализом механизмов переноса дано в работе [14]. Способы улучшения нефтегазового сепаратора рассмотрены в работе [15]. Разделение аэрозольных систем на примере мультивихревого сепаратора дано в статьях [16, 17].

Применение вихревых аппаратов для газоочистки представлено в многочисленных работах А.Ф. Махоткина, А.Н. Николаева, В.И. Петрова и многих других авторов. Показана высокая эффективность таких аппаратов с большой производительностью, однако вихревые аппараты характеризуются повышенными энергозатратами.

В монографии [18] представлены десятки конструкций регулярных и нерегулярных насадок отечественных и зарубежных фирм, а также даны их гидравлические характеристики в виде графических зависимостей или таблиц. В монографии [19] кроме конструктивных характеристик многих насадочных элементов даны экспериментальные исследования гидравлического сопротивления, задержки жидкости, активной поверхности, а также математические модели для расчета эффективности тепло-и массообмена. Гидродинамика и массообмен для ряда хаотичных и регулярных насадок представлены в монографии [20], где также показаны различные виды неравномерностей распределения газа и жидкости в различных сечениях аппаратов. Применение математических моделей гидродинамической структуры потоков показано в монографии [21], где даны как теоретические, так и экспериментальные результаты по расчету эффективности тепломассообменных

аппаратов.

Фундаментальные исследования движения и осаждения аэрозольных систем представлены в монографии [22], где показано, что основным механизмом сепарации является турбулентно-инерционный. Очистка газовых сред при интенсивном гидродинамическом режиме рассмотрено в монографии [23], где детально исследованы механизмы турбулентного переноса и дан ряд важных математических моделей для расчета эффективности сепарации. Математическая модель очистки природного газа в местах добычи при его охлаждении в аппарате с спиральным расположением витых трубок представлена в работе [24]. Даны результаты расчета сепарации масляных аэрозолей с учетом центробежного и турбулентного механизмов. В учебно-справочном пособии [25] показаны примеры применения теории турбулентной миграции частиц для аппаратов различных конструкций. Однако в рассмотренных выше научных работах не учитывается неоднородность газового потока в газосепараторах, поэтому целью данной статьи является представить математическую модель с методикой расчета разделения жидких аэрозольных систем с учетом неравномерного профиля скорости газа.

Целью работы является на основе разработанной математической модели создание инженерной методики расчета эффективности насадочных скрубберов – охладителей совместно с разделением аэрозолей с привлечением данных по гидравлическому сопротивлению локальных зон слоя хаотичной насадки и неравномерного профиля скорости газа.

Научная новизна состоит в математической модели сепарации аэрозолей, которая с небольшими вычислительными затратами позволяет прогнозировать влияние неоднородности размещения насадки и неравномерность профиля скорости газа на эффективность процесса разделения.

Практической значимостью: установленное влияние неравномерного профиля скорости газа в насадочном слое на профиль концентрации частиц и на эффективность сепарации аэрозолей, что очень важно при проектировании или модернизации скрубберов – охладителей.

Математическая модель (Mathematical model)

Рассматривается стационарное стабилизированное движение газа с жидкими аэрозольными тонкодисперсными частицами (< 20 мкм) в вертикальном канале. Режим движения газа в канале без внутренних устройств турбулентный ($Re_r > 10^4$, где $Re = w_r d_s / \nu_r$ – число Рейнольдса; w_r – средняя скорость газа, м/с; d_s – эквивалентный диаметр канала, м; ν_r – кинематический коэффициент вязкости газа, m^2/c). За счет турбулентно-инерционного механизма происходит миграция аэрозольных частиц к стенке канала и достигая поверхности аэрозольные частицы прилипают к стенке и образуется тонкая пленка, которая за счет силы тяжести стекает вниз. Пленка, как правило, имеет волновую поверхность, что увеличивает касательное напряжение газового потока на межфазной границе, за счет этого повышается гидравлическое сопротивление канала и эффективность сепарации увеличивается.

Для вертикальных каналов дифференциальное уравнение массопереноса аэрозольных частиц записывается в виде [22]

$$w_r(y) \frac{\partial C_q}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left[D_{тq}(y) \frac{\partial C_q}{\partial y} \right] - [C_q u_t(y)] \right\}, \quad (1)$$

где $w_r(y)$ – скорость газа, как функция поперечной координаты, м/с; x – продольная координата, м; C_q – концентрация частиц, $кг/м^3$; $D_{тq}$ – коэффициент турбулентной диффузии частиц, $м^2/с$; u_t – коэффициент скорости турбулентной миграции частиц к стенке канала, м/с.

Граничные условия к уравнению (1) записываются в виде:

при $x = 0$, $C_q = C_{нq}$ (вход газа);

при $x = l$, $C_q = C_{кq}$ (выход газа);

при $y = R$, $w_r(y) = 0$; $\partial C_q / \partial y = 0$; $j_q = u_t C_q$ (на стенке канала),

при $y = 0$, $\partial C_q / \partial y = 0$ (на оси симметрии канала).

где l – длина канала, м;

R – радиус канала, м;

n, k – начальное и конечное значение;

j_q – плотность потока частиц, $кг/(м^2 c)$.

На стенке канала принимается $C_q = 0$ так как частица аэрозоля покинула газовую фазу и прилипла к стенке (к пленке). Локальный поток массы частиц в теории турбулентной миграции записывается в виде $j_q = u_t C_q$, где C_q – средняя концентрация частиц в поперечном сечении канала, кг/м^3 .

В канале (аппарате) заполненном нерегулярными (хаотичными) насадками задать граничные условия на поверхности каждого хаотично расположенного элемента не представляется возможным, так как таких элементов может быть несколько тысяч с неизвестной функцией распределения в объеме аппарата. В таких случаях при математическом моделировании используется объемный межфазный источник переноса, который записывается в виде $R_q = j_q F / V_n$, где F – площадь поверхности насадки, м^2 , V_n – объем насадки, м^3 . Отношение $F / V_n = a_v$ – удельная поверхность насадки, $\text{м}^2/\text{м}^3$, значение которой для каждой конструкции и типоразмера дается в специальной литературе [18-20]. Тогда $R_q = j_q a_v$ и уравнение массопереноса получит вид:

$$w_r(y) \frac{\partial C_q}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} D_{тq}(y) \frac{\partial C_q}{\partial y} + j_q a_v, \quad (2)$$

где конструктивные характеристики насадки, скорость переноса и осаждения аэрозолей учитывается за счет коэффициента $D_{тq}(y)$ и источника массы $j_q a_v$.

Можно считать, что такая форма записи уравнения (2) является упрощенной формой частного случая модели многоскоростного континуума, где допускается, что фазы заполняют один и тот же объем аппарата с учетом взаимодействий с помощью межфазных источников.

Коэффициент турбулентной диффузии частиц можно вычислить по выражению [22]:

$$D_{тq} = \frac{D_t}{1 + \omega_E \tau_p}, \quad (3)$$

где D_t – коэффициент турбулентной диффузии в газовой фазе, $\text{м}^2/\text{с}$; обычно принимается $D_t \approx \nu_t$, где ν_t – коэффициент турбулентной вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; $\omega_E = u_* / (0,1R)$ – частота энергоемких пульсаций, с^{-1} ; u_* – динамическая скорость (скорость трения), м/с ; $\tau_p = d_q^2 \rho_q / (18\mu_t)$ – время релаксации частицы, с ; d_q – диаметр частицы, м ; ρ_q – плотность частицы, кг/м^3 ; μ_t – коэффициент динамической вязкости, $\text{Па} \cdot \text{с}$.

Для определения скорости турбулентной миграции частиц применяются полуэмпирические выражения, связанные с безразмерным временем релаксации $\tau^+ = u_*^2 \tau_p / \nu_t$. Как правило, это степенные зависимости вида $u_t^+ = u_t / u_* = A(\tau^+)^2$, где A – эмпирический коэффициент.

Наибольшие применения получили выражения В.П. Медникова [22]:

при $\mu_p^2 \tau^+ \leq 16,6$, $u_t^+ = 7,25 \cdot 10^{-4} \left[\tau^+ / (1 + \omega_E \tau_p) \right]^2$;

при $\mu_p^2 \tau^+ > 16,6$, $u_t^+ = 0,2$; где $u_t^+ = u_t / u_*$; $\mu_p = 1 / (1 + \omega_E \tau_p)^{0,5}$.

Уравнение (2) при известных значениях $D_{тq}(y)$ и u_t может решаться численно с заданными граничными условиями. Результаты решения даны в работах [21, 25, 26].

Представленные выражения для u_t^+ получены для вертикальных каналов при развитом турбулентном режиме движения аэрозольных систем. В хаотичном насадочном слое извилистость каналов для прохождения газа можно учесть за счет поправки Дэвисона $k = \pi / 2$. Тогда для насадочного слоя запишем $\bar{u}_t^+ = \pi u_t^+ / 2$.

Упрощенная модель (Simplified model)

В аппаратах химической технологии получили применение комбинированные, структурные и поликанальные математические и другие модели, которые применяются для инженерных расчетов массообменных аппаратов с двухфазными средами (насадочные, барботажные и другие) [20, 21].

Рассмотрим применение поликанальной модели для расчета насадочного газосепаратора аэрозолей с учетом неравномерного (неоднородного) профиля скорости газа в слое хаотичной насадки. Неравномерность скорости газа может быть вызвана как условиями подачи в аппарат и неоднородностью размещения контактных элементов.

Известно [19, 20], что у стенок аппарата порозность (удельный свободный объем) меньше, чем в центре. Это вызывает повышенную скорость газа в пристенной области, чем в центре аппарата. Такие неравномерности могут достигать $w_{\text{гм}} / w_{\text{го}}$ от 1,2 до 2,2, где $w_{\text{гм}}$ – максимальное значение скорости в локальной области, м/с; $w_{\text{го}}$ – средняя скорость в насадочном слое, м/с. Отношение $w_{\text{гм}} / w_{\text{го}}$ иногда называют коэффициентом неравномерности. Экспериментальные данные профиля скорости представлены на рисунках 1 и 2 [19].

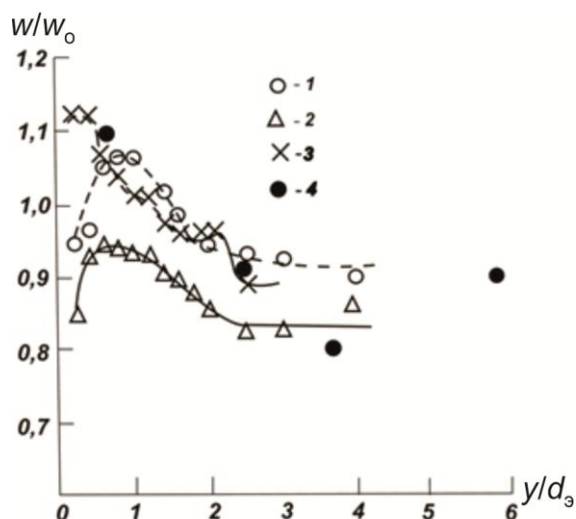


Рис. 1. Профили скорости в аппарате, загруженном различными насадками: 1 – кольца Рашига; 2 – насадка типа N1; 3 – насадка типа MS; 4 – кольца Рашига [12]

Fig. 1. Speed profiles in a machine loaded with various nozzles: 1 – Raschig rings; 2 – nozzle type N1; 3 – nozzle type MS; 4 – Raschig rings

*Источник (Source): Fei Zhang, Youyu Lu, Shaoyan Zhu, Funian Han, Guanghua Wen, Ping Tang, Zibing Hou. Mathematical model and numerical investigation of the influence of spray drying parameters on granule sizes of mold powder. Particuology Volume 85, February 2024, Pages 280-295

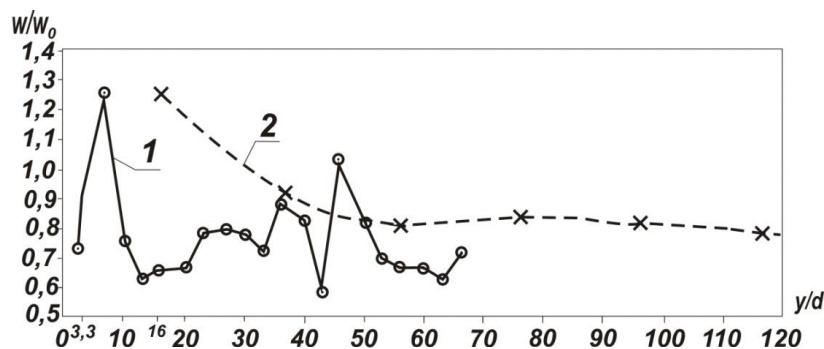


Рис. 2. Безразмерные профили скорости в аппаратах большого размера при обычной загрузке по данным [12]: 1 – $D/d=133.3$ – Клёнова; 2 – $D/d=280$ – Попова

Fig. 2. Dimensionless speed profiles in large devices with normal loading according to [12]: 1 – $D/d=133.3$ – Klenova; 2 – $D/d=280$ – Popova

*Источник (Source): Fei Zhang, Youyu Lu, Shaoyan Zhu, Funian Han, Guanghua Wen, Ping Tang, Zibing Hou. Mathematical model and numerical investigation of the influence of spray drying parameters on granule sizes of mold powder. Particuology Volume 85, February 2024, Pages 280-295

Известно, что неравномерности распределения фаз значительно снижают эффективность как теплообменных, так и сепарационных процессов.

Для математического моделирования профилей концентраций дисперсной фазы в газах и расчета локальной и средней эффективности разделения аэрозольных систем представим насадочный слой в виде параллельных каналов по высоте (рис. 3). Используем одномерные уравнение массопереноса частиц с источниками массы. В каждом канале в зависимости от профиля скорости газа вычисляются соответствующие значения коэффициента турбулентной диффузии частиц $D_{\text{тч}}$ и источник массы R_c .

Следует отметить, что в канале (аппарате) заполненным хаотичными элементами (насадкой) турбулентный режим начинается уже при $Re_r > 40$ [20].

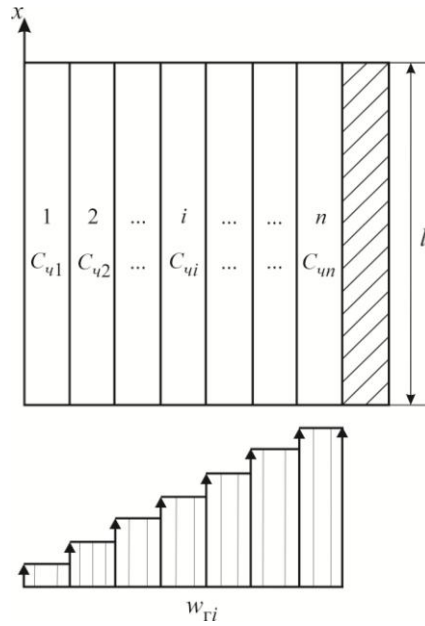


Рис 3. Условное деление насадочного слоя ряд параллельных каналов Fig 3. Conditional division of the packing layer a number of parallel channels

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

Уравнения массопереноса частиц в ядре потока аэрозольной системы для i -го канала имеет вид:

$$w_{ri} \frac{dC_{qi}}{dx} = D_{\tau qi} \frac{d^2 C_{qi}}{dx^2} + R_{qi}, \quad (4)$$

$i = 1, 2, \dots, n$; n – число каналов (рис. 3).

При решении задачи совместного «мокрого» охлаждения газа с сепарацией дисперсной фазы аналогичные уравнения записываются для теплообмена между газовой и жидкой фазами и массообмена влаги.

Уравнение (4) решается при $x = 0$, $w_{ri} = w_{rni}$; $C_{ri} = C_{rn}$: при $x = l$, $dC_q / dx = 0$; C_{rn} принимается средней по сечению перед входом в слой.

На выходе из насадочного слоя усреднения концентрация частиц будет равна

$$\bar{C}_{гк} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{ri} C_{ri})}{V_r}, \quad (5)$$

где V_r – объемный расход газа, m^3/c .

Локальная эффективность сепарации в канале и всего насадочного слоя будет

$$\eta_i = \frac{C_{rn} - C_{ri}}{C_{rn}}, \quad \eta = \frac{C_{rn} - \bar{C}_{гк}}{C_{rn}}. \quad (6)$$

Средний коэффициент турбулентной диффузии частиц в ядре газовой фазы на основе выражения (3) для хаотичной насадки записывается в виде [21, 25]

$$D_{\tau qi} = \frac{3,86 v_r \sqrt{\xi_i Re_{ri}}}{1 + \omega_{Ei} \tau_p}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (7)$$

где $Re_{ri} = w_{ri} d_3 / v_r$ – число Рейнольдса в канале; d_3 – эквивалентный диаметр насадки, м; ξ_i – коэффициент гидравлического сопротивления канала, $\xi_i = f(Re_{ri})$ вычисляется по эмпирическим выражения в зависимости вида и характеристик насадки [19, 20].

Расчет средней динамической скорости u_{*ri} для вычисления ω_{Ei} и u_{li} по выражению для хаотичной насадки ($Re_r > 40$) [21, 25]:

$$u_{*i} = 1,56 w_{ri} (\xi_i / Re_{ri})^{0,25}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

Дифференциальное уравнение (4) решается численно методом прогонки при

заданных начальных условиях и вычисленных значениях $D_{тqi}$ и R_{qi} , $i=1,2,...,n$. Результаты решения уравнения (4) с учетом неравномерного профиля скорости газа даны ниже.

Результаты решения (The results of the decision)

В качестве примера использована трехканальная модель сепарации мелких капель воды ($d_q = 5$ мкм) из воздуха при средней скорости воздуха $w_r = 6$ м/с и высоте насадки $H = 1,0$ м. Рассматривается симметрическая задача от оси симметрии до стенки (т.е. от $r = 0$, до $r = R$). Каналы имеют одинаковую ширину, равную R/n ($n=3$). Для наглядности принято в канале ($i=1$) у оси симметрии скорость воздуха $w_{1r} = 3$ м/с, в центральном канале ($i=2$) $w_{2r} = 6$ м/с, в канале у стенки ($i=3$) $w_{3r} = 9$ м/с.

Таким образом, коэффициент неравномерности профиля скорости газа в канале у оси симметрии составляет $w_r / w_o = 0,5$, в среднем канале $w_{2r} / w_o = 1,0$ и у стенки $w_{3r} / w_o = 1,5$. Принимается, что насадка распределена в объеме слоя однородно, однако математическая модель позволяет учесть и неоднородность распределения поверхности в аппарате за счет локальной удельной поверхности в каналах.

Результаты решения (4) в виде безразмерных профилей C_i/C_n по высоте каналов даны на рисунках 4 и 5. На рисунке 4 насадка из металлических колец Рашига 50 мм, на рисунке 5 из колец 25 мм. Очевидно, что чем меньше размер элемента насадки, тем более удельная поверхность a_v (кольца 50 мм, $a_v = 110 \text{ м}^2/\text{м}^3$; 25 мм, $a_v = 220 \text{ м}^2/\text{м}^3$;) и происходит более резкое падение профиля концентрации частиц по длине и выше эффективность сепарации. Причем, чем меньше скорость воздуха в канале, тем ниже эффективность разделения аэрозолей. Это связано с зависимостью коэффициента скорости турбулентной миграции u_t мелких капель от скорости газа, т.е. $u_t \sim w_r^4$, что указывает на турбулентно-инерционный механизм переноса. В насадке из колец 50 мм эффективность сепарации в первой зоне (канале, где $w_r = 3$ м/с) эффективность составляет $\eta_1 = 0,118$. Во втором канале при $w_r = 6$ м/с $\eta_2 = 0,585$, и в третьем у стенки при $w_r = 9$ м/с $\eta = 0,852$. Средняя эффективность сепарации при таких неравномерностях составляет $\eta = 0,518$. При равномерном профиле скорости, равным средней скорости в колонне (т.е. $w_r = 6$ м/с) эффективность сепарации как в среднем канале, т.е. $\eta = 0,585$. Отсюда следует, что с учетом неравномерностей средняя эффективность разделения в газосепараторе с кольцами 50 мм снижается на 12% относительных при высоте насадочного слоя $H = 1,0$ м.

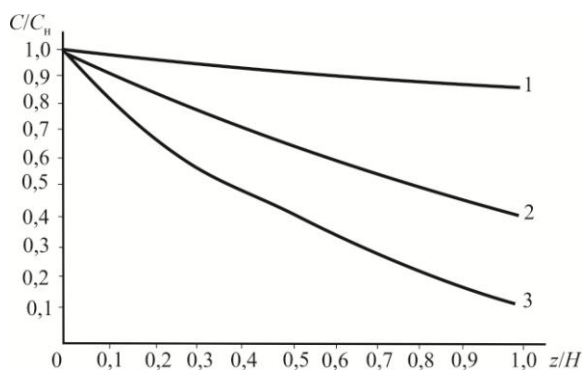


Рис. 4. Профили концентрации аэрозольных частиц воды диаметром 5 мкм ($\rho_{ж} = 10^3 \text{ кг/м}^3$) в воздухе в трех сечениях насадочного газосепаратора с кольцами Рашига 50 мм по высоте слоя: кривые 1 – в центре аппарата ($i=1$); 2 – при $i=2$ и 3 – при $i=3$ (у стенки). Скорости газа в каналах 1 – $w_{1r} = 3$ м/с; 2 – $w_{2r} = 6$ м/с и 3 – $w_{3r} = 9$ м/с

Fig. 4. Profiles of the concentration of aerosol water particles with a diameter of 5 microns ($\rho_j = 10^3 \text{ kg/m}^3$) in the air in three sections of a nozzle gas separator with Raschig rings of 50 mm in layer height: curves 1 – in the center of the apparatus ($i=1$); 2 – at $i=2$ and 3 – at $i=3$ (at the wall). Gas velocities in channels 1 – $w_{1g} = 3$ m/s; 2 – $w_{2g} = 6$ m/s and 3 – $w_{3g} = 9$ m/s

*Источник (Source): Fei Zhang, Youyu Lu, Shaoyan Zhu, Funian Han, Guanghua Wen, Ping Tang, Zibing Hou. Mathematical model and numerical investigation of the influence of spray drying parameters on granule sizes of mold powder. Particuology Volume 85, February 2024, Pages 280-295

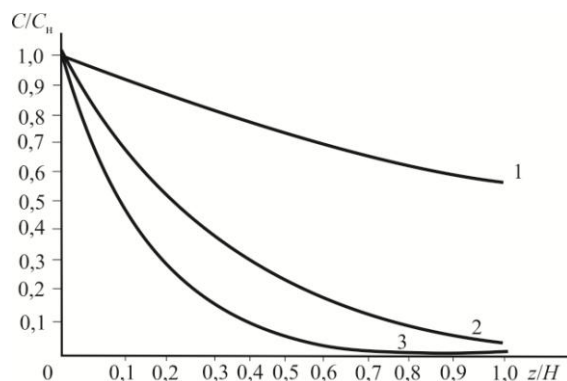


Рис. 5. Профили концентрации частиц по высоте слоя для насадки из колец Рашига 25 мм – кривые 1 – в центре аппарата; при $i = 1$; 2 – при $i = 2$ и 3 – $i = 3$. Скорость газа 1 – $w_{1g} = 3$ м/с; 2 – $w_{2g} = 6$ м/с и 3 – $w_{3g} = 9$ м/с

*Источник (Source): Fei Zhang, Youyu Lu, Shaoyan Zhu, Funian Han, Guanghua Wen, Ping Tang, Zibing Hou. Mathematical model and numerical investigation of the influence of spray drying parameters on granule sizes of mold powder. Particuology Volume 85, February 2024, Pages 280-295

В аппарате с насадкой 25 мм при $H = 1,0$ м эффективность в каналах составляет $\eta_1 = 0,488$; $\eta_2 = 0,970$; $\eta_3 = 0,9998$. Средняя эффективность с учетом неравномерностей $\eta = 0,819$, при равномерном профиле скорости $\eta = 0,970$, т.е. снижение составляет 18 %. Средняя эффективность сепарации, с учетом неравномерностей также зависит от высоты насадочного слоя.

На рисунке 6 представлены результаты расчета при высоте слоя от 0,5 до 2,0 м. Установлено, что для насадки 50 мм при $H = 2,0$ м снижение эффективности составляет около 33%, при $H = 0,5$ м – около 5%. Для насадки 25 мм снижение эффективности сепарации от 11% ($H = 2,0$ м) до 18% ($H = 0,5$ м).

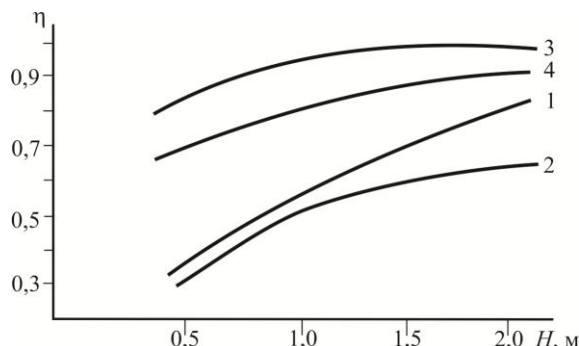


Рис. 6. Зависимость эффективности сепарации аэрозолей ($d_p = 5$ мкм) от высоты насадочного слоя. 1, 2 – кольца Рашига 50 мм; 3, 4 – 25 мм. 1, 3 – равномерное распределение газа; 2, 4 – неравномерный профиль скорости: в зоне у стенки $w_m / w_0 = 1,5$ в центре $w_m / w_0 = 0,5$. Средняя скорость газа $w_r = 6$ м/с

Fig.6 Dependence of aerosol separation efficiency on the height of the packing layer. 1.2 – Raschig rings of 50 mm; 3.4 – 25 mm. 1-3 – uniform distribution of gas; 2.4 – uneven velocity profile: in the zone near $w_m / w_0 = 1,5$ the wall in the center $w_m / w_0 = 0,5$. Average gas velocity $w_r = 6$ м/с

*Источник (Source): Fei Zhang, Youyu Lu, Shaoyan Zhu, Funian Han, Guanghua Wen, Ping Tang, Zibing Hou. Mathematical model and numerical investigation of the influence of spray drying parameters on granule sizes of mold powder. Particuology Volume 85, February 2024, Pages 280-295

Таким образом, установлено, что при неравномерном профиле скорости газа снижение эффективности процесса также зависит и от высоты слоя насадки. Повышенная скорость газа в пристенной области аппарата (рис. 1-2) может быть вызвана как неравномерной подачей газа в нижней части аппарата, а также главным образом пониженной порозностью насадки у стенки. Отсюда следует, что в пристенной области удельная поверхность меньше, чем средняя по всему объему, что можно учесть за счет источника массы в правой части уравнения (4). Тогда эффективность сепарации будет ниже чем представлено в расчетах. Учет такого вида неоднородностей является

отдельным предметом исследований.

Заключение (Conclusions)

В результате выполненных исследований с применением разработанной поликанальной математической модели в виде системы одномерных дифференциальных уравнений массопереноса частиц, установлено влияние неоднородного профиля скорости аэрозольной системы в хаотичной насадке на эффективность очистки газов от жидких аэрозольных частиц. Получено, что снижение эффективности разделения зависит не только от неоднородного профиля скорости газа, но и от размера элементов хаотичной насадки, а также от высоты слоя. При увеличении размера насадки влияние неравномерностей усиливается, как и при повышении высоты хаотичного слоя. Так максимальное снижение эффективности процесса разделения на 33% установлено для колец 50 мм при высоте слоя 2 метра. Для насадки из колец 25 мм снижение эффективности в два раза меньше. Разработанная математическая модель и методика расчета может применяться при проектировании или модернизации газосепараторов и скрубберов – охладителей насадочного типа.

Литература

1. Бирюков А.Б., Лебедев А.Н., Каминский К.Д. Использование комбинированных устройств глубокого охлаждения дымовых газов на водогрейных котлах системы ЖКХ // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. 2024. № 1. С. 69-81.
2. Платонов Н.И. Расчет теплообмена между газом и свободной жидкостной пленкой в контактом теплообменнике // Теплоэнергетика. 2008. № 3. С. 18-23.
3. Алешин В.И., Рубан В.С., Сазоненко В.М. Ресурсосберегающие способы охлаждения сжимаемого газа // Известия вузов. 2020. Пищевая технология. №1 (373) с. 73-77.
4. Хайбулов Р.А. Исследование гидродинамических характеристик контактного устройства массообменного аппарата с направленным вводом газа // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2024. № 1(20) с. 231-238.
5. Широков В.А., Орлова М.Н. Методика расчета эффективности использования теплоты продуктов сгорания природного газа в контактных теплообменниках // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2023. №1 (310) с. 50-54.
6. Покрышкин К.В. и др. Современные схемы конечного охлаждения коксового газа // Кокс и химия. 2024. №8. с.26-35.
7. Бахронов Х.Ш., Ганиева С.У. Ход развития аппаратов для очистки газов от пыли // Journal of agvanes in engineering technology. 2022. №2. с. 33-38.
8. Орлов А.О., Чернушевич Е.Э., Макамович С.С., Лепетило С.И. Очистка дымовых газов от оксида азота и угольной пыли // Современные достижения научно-технического прогресса. 2023. №2(7). С.14-18.
9. Маслובитов М.В., Козлов Д.А., Булгаков Д.М., Рязанцева А.В. Методы очистки от угольной пыли уходящих газов на ТЭЦ // Тенденции развития науки и образования. 2021. № 73-3. С. 104-109.
10. Karimov L., Qo'choarov B. Resistan coefficients the apparatus with mesh wet cleaning of gust gases // Fergana Polytechie Instute. 2023. № 1-5 (106). С. 8-13.
11. D. Dorhjie, D. Pereponov, T. Aminev, A. Gimazov, D. Khamidullin, D. Kuporosoov, M. Tarkhov1, A. Rykov, I. Filippov, E. Mukhina, E. Shilov, P. Grishin and A. Cheremisin. Kinetics of Phase Separation and Saturation Profile of Gas Condensates: a Microfluidic and Numerical Analysis // European Association of Geoscientists & Engineers 85th EAGE Annual Conference & Exhibition (including the Workshop Programme), Jun 2024, Volume 2024, p.1 – 5.
12. Fei Zhang, Youyu Lu, Shaoyan Zhu, Funian Han, Guanghua Wen, Ping Tang, Zibing Hou. Mathematical model and numerical investigation of the influence of spray drying parameters on granule sizes of mold powder. Particuology Volume 85, February 2024, Pages 280-295
13. Vasył Mykhailiuk, Michał Zasadzień, Mikhaïlo Liakh, Ruslan Deineha, Yurii Mosora and Oleh Faflei. Analysis of the Possibility of Modeling Gas Separators using Computational Fluid Dynamics // Management Systems in Production Engineering Volume 32 (2024): Issue 1 (March 2024)
14. Lele Yang a, Xiaodong Chen a, Chengyu Huang a, Sen Liu b, Bo Ning c, Kai Wang b A review of gas-liquid separation technologies: Separation mechanism, application scope, research status, and development prospects // Chemical Engineering Research and Design. Volume 201, January 2024, Pages 257-274.
15. O. Liaposhchenko et al., "Improvement of Parameters for the Multi-Functional Oil-Gas Separator of "HEATER-TREATER" Type," 2019 IEEE 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), Tokyo, Japan, 2019, pp. 66-71.

16. Эффективность прямоугольного сепаратора в зависимости от оформления элементов внутри аппарата / А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, О. С. Дмитриева, В. Л. Нгуен // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2018. – Т. 10, № 1(37). – С. 74-81.
17. Сравнение технических характеристик мультивихревого сепаратора с циклонами различных модификаций / В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, Р. Я. Биккулов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 117-127.
18. Сокол, Б. А., Чернышев А. К., Баранов. Д. А. Насадки массообменных колонн : – Москва : Галилея-принт, 2009. – 358 с.
19. Контактные насадки промышленных тепломассообменных аппаратов: монография / А. М. Каган, А. Г. Лаптев, А. С. Пушнов, М. И. Фарахов / под ред. А. Г. Лаптева. – Казань: Отечество, 2013. – 454 с.
20. Витковская, Р. Ф. Аэродинамика и тепломассообмен насадочных аппаратов / Р. Ф. Витковская, А. С. Пушков, С. Шинкунас. — Санкт-Петербург : Лань, 2019. – 288 с.
21. Лаптев А. Г., Башаров М. М., Лаптева Е. А. Математические модели и методы расчетов тепломассообменных и сепарационных процессов в двухфазных средах : – Казань : КГЭУ; Старый Оскол : ТНТ, 2021. – 288 с.
22. Медников, Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей: монография / Е. П. Медников. – Москва : Наука, 1980. – 176 с.
23. Сугак, Е. В., Войнов Н. А., Николаев Н. А. Очистка газовых выбросов в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами // Сибирская аэрокосмическая акад., Сибирский гос. технологический ун-т, Казанский гос. технологический ун-т. - 2-е изд. - Казань : Отечество, 2009. - 222 с.
24. Снижение потерь масла в компрессорных установках при охлаждении и перекачивании природного газа. Часть 1. Описание технологической схемы и математическая модель процесса / Т. Ф. Кадыров, А. А. Касьяненко, А. Г. Лаптев [и др.] // Газовая промышленность. – 2023. – № 9(854). – С. 72-80.
25. Лаптев, А.Г. Гидромеханические процессы в аппаратах химической технологии. учебно-справочное пособие для вузов / А.Г. Лаптев – Санкт-Петербург: Лань, 2024 – 592 с.
26. Laptev A.G., Lapteva E.A., Basharov M.M. Separation and energy efficiency of packed apparatuses for purifying gases from aerosols // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2017. Т. 51. № 5. С. 639-646.

Авторы публикации

Лаптева Елена Анатольевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6811-6219>. Email: grivka100@mail.ru

Сеймур Ульви Оглы Аласгарли – аспирант кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» (ИЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. ORCID <https://orcid.org/0009-0003-4393-2756>. Email: sem_aleskerli@mail.ru

Клочкова Валентина Александровна – аспирант, инженер 1 категории кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» (ИЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. ORCID <https://orcid.org/0009-0003-6560-9757> Email: klochkova.valentinka@mail.ru

References

1. Biryukov A.B., Lebedev A.N., Kamensky K.D. Application of combined devices for deep cooling of flue gases on hot water boilers of the housing and communal services system // Bulletin of Donetsk National University. Series G: Technical Sciences. 2024. No. 1. pp. 69-81.
2. Platonov N.I. Calculation of heat and mass transfer between a gas and a free liquid film in a contact heat exchanger// Thermal power engineering. 2008. No. 3. pp. 18-23.
3. Aleshin V.I., Ruban V.S., Sazonenko V.M. Resource-saving methods of cooling compressed gas// News of universities. 2020. Food technology. No.1 (373) pp. 73-77.
4. Khaibulov R.A. Investigation of the hydrodynamic characteristics of the contact device of a mass transfer apparatus with directional gas input // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. 2024. No. 1(20) pp. 231-238.

5. Shirokov V.A., Orlova M.N. Methodology for calculating the efficiency of using the heat of natural gas combustion products in contact heat exchangers // *Environmental protection in the oil and gas complex*. 2023. No.1 (310) pp. 50-54.
6. Pokryshkin K.V. et al. Modern schemes of final cooling of coke oven gas // *Coke and chemistry*. 2024. No.8. pp.26-35.
7. Bakhronov H.Sh., Ganieva S.U. The course of development of devices for cleaning gases from dust // *Journal of advances in engineering technology*. 2022.No.2. pp. 33-38.
8. Orlov A.O., Chernushevich E.E., Makamovich S.S., Lepetilo S.I. Purification of flue gases from nitrogen oxide and coal dust // *Modern achievements of scientific and technical progress*. 2023. No.2(7). pp.14-18.
9. Maslobitov M.V., Kozlov D.A., Bulgakov D.M., Ryazantseva A.V. Methods of cleaning exhaust gases from coal dust at CHP plants // *Trends in the development of science and education*. 2021. No. 73-3. pp. 104-109.
10. Karimov L., Qo'choarov B. Resistan coefficients the apparatus with mesh wet cleaning of gust gases // *Fergana Polytechie Instute*. 2023. № 1-5 (106). C. 8-13.
11. D. Dorhjie, D. Pereponov, T. Aminev, A. Gimazov, D. Khamidullin, D. Kuporosoov, M. Tarkhov1, A. Rykov, I. Filippov, E. Mukhina, E. Shilov, P. Grishin and A. Cheremisin. Kinetics of Phase Separation and Saturation Profile of Gas Condensates: a Microfluidic and Numerical Analysis // *European Association of Geoscientists & Engineers 85th EAGE Annual Conference & Exhibition (including the Workshop Programme)*, Jun 2024, Volume 2024, p.1 – 5.
12. Fei Zhang, Youyu Lu, Shaoyan Zhu, Funian Han, Guanghua Wen, Ping Tang, Zibing Hou. Mathematical model and numerical investigation of the influence of spray drying parameters on granule sizes of mold powder. *Particuology* Volume 85, February 2024, Pages 280-295
13. Vasyl Mykhailiuk, Michał Zasadzień, Mikhaïlo Liakh, Ruslan Deineha, Yurii Mosora and Oleh Faflei. Analysis of the Possibility of Modeling Gas Separators using Computational Fluid Dynamics // *Management Systems in Production Engineering* Volume 32 (2024): Issue 1 (March 2024)
14. Lele Yang a, Xiaodong Chen a, Chengyu Huang a, Sen Liu b, Bo Ning c, Kai Wang b A review of gas-liquid separation technologies: Separation mechanism, application scope, research status, and development prospects // *Chemical Engineering Research and Design*. Volume 201, January 2024, Pages 257-274.
15. O. Liaposhchenko et al., "Improvement of Parameters for the Multi-Functional Oil-Gas Separator of "HEATER-TREATER" Type," 2019 IEEE 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), Tokyo, Japan, 2019, pp. 66-71.
16. The efficiency of a rectangular separator depending on the design of the elements inside the apparatus / A.V. Dmitriev, V. E. Zinurov, O. S. Dmitrieva, V. L. Nguyen // *Bulletin of the Kazan State Energy University*. - 2018. – Vol. 10, No. 1(37). – pp. 74-81.
17. Comparison of the technical characteristics of a multi-vortex separator with cyclones of various modifications / V. E. Zinurov, A.V. Dmitriev, R. Ya. Bikkulov [et al.] // *Izvestia of higher educational institutions. Energy problems*. – 2023. – Vol. 25, No. 3. – pp. 117-127.
18. Sokol, B. A., Chernyshev A. K., Baranov. D. A. Nozzles of mass transfer columns : – Moscow : Galilee-print, 2009. – 358 p.
19. Contact nozzles of industrial heat and mass transfer devices: monograph / A.M. Kagan, A. G. Laptev, A. S. Pushnov, M. I. Farakhov / edited by A. G. Laptev. – Kazan: Fatherland, 2013. – 454 p.
20. Vitkovskaya, R. F. Aerodynamics and heat and mass transfer of nozzle devices / R. F. Vitkovskaya, A. S. Pushkov, S. Shinkunas. — St. Petersburg : Lan, 2019. – 288 p.
21. Laptev A. G., Basharov M. M., Lapteva E. A. Mathematical models and calculation methods of heat and mass transfer and separation processes in two-phase media : – Kazan : KGEU; Stary Oskol : TNT, 2021. – 288 p.
22. Mednikov, E. P. Turbulent transport and aerosol deposition: monograph / E. P. Mednikov. – Moscow : Nauka, 1980. – 176 p.
23. Sugak, E. V., Voynov N. A., Nikolaev N. A. Purification of gas emissions in devices with intensive hydrodynamic regimes // *Siberian Aerospace Academy, Siberian State Technological University, Kazan State Technological University - 2nd ed. - Kazan : Fatherland, 2009. - 222 p.*
24. Reduction of oil losses in compressor units during cooling and pumping of natural gas. Part 1. Description of the technological scheme and mathematical model of the process / T. F. Kadyrov, A. A. Kasyanenko, A. G. Laptev [et al.] // *Gas industry*. – 2023. – № 9(854). – Pp. 72-80.
25. Laptev, A.G. Hydromechanical processes in chemical technology devices. educational reference manual for universities / A.G. Laptev – St. Petersburg: Lan, 2024 – 592 p.
26. Laptev A.G., Lapteva E.A., Basharov M.M. Separation and energy efficiency of packed apparatuses for purifying gases from aerosols // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2017. T. 51. № 5. C. 639-646.

Authors of the publication

Elena A. Lapteva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6811-6219> Email: grivka100@mail.ru

Seymur Ulvi Ogly Alasgarli – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4393-2756> Email: sem_aleskerli@mail.ru

Valentina A. Klochkova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6560-9757> Email: klochkova.valentinka@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **26.11.2024 г.**

Отредактировано **06.12.2024 г.**

Принято **17.01.2025 г.**

Сдано в набор 15.02.2025 г.
Бумага офсет 80 г. Печать
ризографическая
Тираж 500 экз.

Подписано к печати 00.00.2025 г.
Усл. печ. л. 18,3
Заказ № 0000
Дата выхода в свет г.00.00.2025 г.

Формат 60*90/8
Уч.изд. л. 11,62.
Цена свободная

