

ISSN 1999-494X (Print)
ISSN 2313-6057 (Online)

**Журнал Сибирского
федерального университета
Техника и технологии**

**Journal of Siberian
Federal University
Engineering & Technologies**

2026 19 (5)

ISSN 1999-494X (Print)
ISSN 2313-6057 (Online)

2026 19(5)

Журнал включен в «Russian Science Citation Index» на платформе «Web of Science»

Индексируется Российским индексом научного цитирования (НЭБ), представлен в международных и российских информационных базах: Ulrich's periodicals directory, EBSCO (США), Google Scholar, ProQuest, Erihplus, READera, КиберЛенинке.

Включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» Высшей аттестационной комиссии.

Журнал Сибирского федерального университета Техника и технологии

Journal of Siberian Federal University Engineering & Technologies

**Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии.
Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies.**

Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ)

Главный редактор: *В.А. Кулагин*. Редакторы *А.В. Прохоренко*, *А.В. Воробьев*.

Корректор *Т.Е. Бастрыгина*. Компьютерная верстка *Е.В. Гревцовой*

№ 5 от 27.08.2026. Индекс: 42328. Тираж: 1000 экз.

Свободная цена

Адрес редакции и издателя:

660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 82, стр. 24, ауд. 117.

Отпечатано в типографии Издательства БИК СФУ

660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 82а.

*Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-28722 от 29.06.2007 г.,
выданное Федеральной службой по надзору в сфере массовых коммуникаций,
связи и охраны культурного наследия.*

<http://journal.sfu-kras.ru>

Подписано в печать 17.08.2026. Формат 60х90/8. Усл. печ. л. 11,1.

Уч.-изд. л. 10,6. Бумага тип. Печать офсетная. Тираж 1000 экз. Заказ № 25981.

Возрастная маркировка в соответствии с Федеральным законом № 436-ФЗ: 16+

CHIEF EDITOR

Vladimir Kulagin, Honorary Worker of Science and technicians of the Russian Federation, Head of the Department of Heat Technology and Fluid Dynamics of Polytechnic Institute of SibFU, Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, member of the expert council of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation on energy, electrification and power mechanical engineering, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0002-5433-7579

EDITORIAL BOARD

- Sergey Alekseenko, Academician of RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Institute of Thermophysics RAS, Siberian Branch, Novosibirsk, Russia;
- Sereeter Batmönkh, Academician of the Mongolian Academy of Sciences, Dr. of Tech., Prof., Institute of Heat Engineering and Industrial Ecology Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia;
- Yuri Galerkin, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia;
- Eugene Garin, Dr. of Tech., Prof., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;
- Alexander Zavorin, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Honored Worker of the Ministry of Fuel and Energy of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia; ORCID 0000-0001-5724-0150;
- Vladimir Zuev, Corresponding member RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of RAS, Siberian Branch, Tomsk, Russia; ORCID 0000-0002-1271-1200;
- Sergey Ivanov, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Transbaikalian State University, Chita, Russia;
- Yuriy Koziratzky, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Military Education and Research Centre of Military-Air Forces «Military-Air Academy name after N.E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin», Voronezh, Russia;
- Genius Kuznetsov, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Dr. Phys.-Math., Prof., Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia;
- Tatiana Kulagina, Honorary Worker of Education of the Russian Federation, Expert of the Russian Academy of Sciences, Dr. of Tech., Prof., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0003-2601-9570;
- Feng-Chen Li, Prof. Dr. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin, China; ORCID 0000-0003-2580-928X;
- Dmitriy Markovich, Academician of RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Institute of Thermophysics RAS, Siberian Branch, Novosibirsk, Russia; ORCID 0000-0002-1348-1806;
- Andrey Minakov, Dr. Phys.-Math., Prof., Siberian Federal University, Institute of Thermophysics of RAS, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0003-1956-5506;
- Valery Mironov, Corresponding member RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC RAS, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0001-7877-9817;
- Vladimir Moskvichev, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Krasnoyarsk Branch of the Federal Research Center for Information and Computing Technologies, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0001-7072-2250;
- Bernard Nacke, Dr. of Tech., Prof., Institute of Electrotechnology Leibniz University, Hannover, Germany;
- Valeriy Nikulin, Honored Scientist of the Udmurt Republic, Honored Engineer of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Kamsk Institute of Humanitarian and Engineering Technologies, Izhevsk, Russia;
- Oleg Ostrovski, Dr. of Tech., Prof., University of New South Wales, Australia;
- Harald Oye, Dr. of Tech., Prof., Norwegian University of Science and Technology, Oslo, Norway;
- Vasili Pantelev, Honorary Worker of Science and technicians of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia; Scopus ID: 57205124847;
- Petr Polyakov, Honored Metallurgist of the RSFSR, Dr. of Tech., Prof., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;
- Miloš Stanković, Prof. Dr., Institute of Applied Sciences, Beograd, Srbija; ORCID 0000-0001-9767-5634;
- Valery Stennikov, Academician of RAS, Dr. of Tech., Prof., Melentiev Energy Systems Institute RAS, Siberian Branch, Irkutsk, Russia; ORCID 0000-0001-6219-0354;
- Viktor Tsubulsky, Dr. Tech., Ch. Scientific Co-worker, National Research Center «Kurchatov Institute», Institute of Economic Forecasting RAS, Moscow, Russia; ORCID 0000-0002-7739-9393;
- Ibragim Khisameev, Corresponding member of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Dr. of Tech., Prof., Kazan State Technological University, Kazan, Russia;
- Nikolai Zuglenok, Corresponding member RAS, Dr. of Tech., Prof., Federal Research Center KSC RAS, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia;
- Vladimir Shaidurov, Academician of RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Institute of Computational Modelling Federal Research Center KSC RAS, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0002-7883-5804
- Anatoly Shvidenko, Doctor of Agricultural Science, Prof., International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.

CONTENTS

Researching. Design. Operating Experience

Orifjon G. Kilichov, Shavkat M. Muzafarov and Z. Z. Ruzikulov

Analysis of the Possibility of Increasing the Efficiency of the Ozone Electrosynthesis Process..... 566

Viktor F. Muratov, Maksim I. Pryazhnikov,

Andrey I. Pryazhnikov, Anton S. Yakimov and Elizaveta N. Volchenko

Rapid Viscosity Measurement of Oilfield Fluids Using a Microfluidic Chip
with Radial Microchannels 575

Alexandra B. Shimanova, Dmitriy A. Uglanov, Viktoriia V. Karnaukh,

Dmitriy V. Sarmin, Alexey L. Lopatin and Artem A. Shimanov

Optimization of the Regasification Contour of a Cryoprocess Operating
on a Two-Cascade Rankine Cycle..... 587

Bogdan E. Timchenko

Analysis of the Thermal And Mass Balances of a Furnace for Thermal Neutralization
of Liquid Waste 605

Yuriy G. Volodin

Experimental Study of Heat Exchange and Friction in Start-Up Mode of Power Plant..... 612

Elena N. Grigorieva

Investigation of the Ash Content of Mixed Pellets..... 621

Maksim Yu. Khatsayuk, Eduard R. Vinter,

Danil D. Dumolakas, Viktor N. Timofeev and Vladimir I. Barsukov

Numerical Study of the Influence of Technological Parameters on the Casting Regime
in an Electromagnetic Field 629

Aleksey S. Drobiazko, Semyon A. Ryzhakov and Victor S. Ratushnyak

Development of an Autonomous Employee Notification System Using LoRa Technology..... 642

Pavel A. Starodubtsev, Igor M. Margulis and Grigory V. Dorofeev

The Results of Analytical, Model and Experimental Studies of the Use of Multistatics
and the Luminal Method..... 653

Math Modeling. Numerical Experiment

Toksan A. Zhakatayev

Iterative Models for Calculating Magnetic and Electric Circuits in Electrical Machines 668

Information and Communication Technologies

Vadim E. Bolshev, Alina V. Vinogradova and Igor O. Volynets

Automatic Classification of Power Outage Causes in 0.4 kV Networks Based
on Text Records Using Machine Learning 684

Памяти доктора технических наук, профессора Лецинской Т.Б..... 696

СОДЕРЖАНИЕ

Исследования. Проектирование. Опыт эксплуатации

О. Г. Киличов, Ш. М. Музафаров, Э. Э. Рузikuлов

Анализ возможности повышения эффективности процесса электросинтеза озона 566

В. Ф. Муратов, М. И. Пряхников,

А. И. Пряхников, А. С. Якимов, Е. Н. Волченко

Экспресс-определение вязкости нефтепромысловых жидкостей

с использованием микрофлюидного чипа с радиальными микроканалами 575

А. Б. Шиманова, Д. А. Угланов, В. В. Карнаух,

Д. В. Сармин, А. Л. Лопатин, А. А. Шиманов

Оптимизация контура регазификации криопродукта, работающего по двухкаскадному

циклу Ренкина 587

Б. Е. Тимченко

Анализ теплового и массового балансов печи для термического обезвреживания

жидких отходов 605

Ю. Г. Володин

Экспериментальное исследование теплообмена и трения в пусковом режиме

энергетической установки 612

Е. Н. Григорьева

Исследование показателей зольности микс-пеллет 621

М. Ю. Хацаюк, Э. Р. Винтер,

Д. Д. Думолакас, В. Н. Тимофеев, В. И. Барсуков

Численное исследование влияния технологических параметров на режим литья

в электромагнитном поле 629

А. С. Дробязко, С. А. Рыжаков, В. С. Ратушняк

Разработка автономной системы оповещения работников с применением технологии LoRa 642

П. А. Стародубцев, И. М. Маргулис, Г. В. Дорофеев

Результаты аналитических, модельных и экспериментальных исследований

использования мультистатистики и просветного метода 653

Математическое моделирование. Численный эксперимент

Т. А. Жакатаев

Итерационные модели для расчета магнитных и электрических цепей

в электрических машинах 668

Информационно-коммуникационные технологии

В. Е. Большев, А. В. Виноградова, И. О. Волынец

Автоматическая классификация причин отключений в сетях 0,4 кВ по текстовым отчетам

с применением машинного обучения 684

Памяти доктора технических наук, профессора Лежневой Т.Б. 696

**Researching. Design.
Operating Experience**

**Исследования.
Проектирование.
Опыт эксплуатации**



EDN: WNGVBN

УДК 631.362.6:546.214

Analysis of the Possibility of Increasing the Efficiency of the Ozone Electrosynthesis Process

Orifjon G. Kilichov*,
Shavkat M. Muzafarov and Z. Z. Ruzikulov
*Tashkent Institute of Irrigation and
Agricultural Mechanization Engineers
Tashkent, Republic of Uzbekistan*

Received 06.11.2025, received in revised form 31.03.2026, accepted 19.05.2026

Abstract. The article provides information about the existing methods of ozone electrosynthesis and identifies their drawbacks. Based on the analysis of processes in the power supply circuit of ozone generators with sinusoidal and pulse voltage of high duty cycle, the possibility of reducing losses and increasing efficiency, increasing the yield of ozone, is substantiated. The distribution of the electric field intensity over the elements of a cylindrical ozone generator was analyzed when it was powered by a sinusoidal and periodic pulse voltage with a duty cycle of more than 5. It was found that it is possible to generate ozone without pre-cooling and drying the air, or cooling the dielectric barrier with running water.

Keywords: ozone, electrosynthesis, sinusoidal, pulse voltages, dielectric barrier, and amplitude.

Citation: Kilichov O. G., Muzafarov Sh. M., Ruzikulov Z. Z. Analysis of the Possibility of Increasing the Efficiency of the Ozone Electrosynthesis Process. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(5), 566–574. EDN: WNGVBN



Анализ возможности повышения эффективности процесса электросинтеза озона

О.Г. Киличов, Ш.М. Музафаров, З.З. Рузикулов

*Ташкентский институт инженеров ирригации
и механизации сельского хозяйства
Республика Узбекистан, Ташкент*

Аннотация. В статье приводятся сведения о существующих способах электросинтеза озона и выявлены их недостатки. На основании анализа процессов в цепи питания генераторов озона синусоидальным и импульсным напряжением большой скважности, обоснована возможность снижения потерь и повышение КПД, увеличение выхода озона. Проведен анализ распределения напряженности электрического поля по элементам цилиндрического генератора озона при питании синусоидальным и периодическим импульсным напряжением скважностью более 5, и выявлена возможность генерирования озона без предварительного охлаждения и высушивания воздуха и охлаждения диэлектрического барьера проточной водой.

Ключевые слова: озон, электросинтез, синусоидальные, импульсные напряжения, диэлектрический барьер, амплитуда.

Цитирование: Киличов О.Г. Анализ возможности повышения эффективности процесса электросинтеза озона / О.Г. Киличов, Ш.М. Музафаров, З.З. Рузикулов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(5). С. 566–574. EDN: WNGVBN

Введение

С момента открытия в конце 18 века озон вызывает неизменный интерес специалистов различного профиля и исследователей благодаря своим уникальным свойствам, в первую очередь высокой окислительной и дезинфицирующей способности. По своим окислительным способностям озон (окислительный потенциал 2.07 В) занимает третье место среди известных окислителей, хлор (1,73 В) – восьмое, а кислород – тринадцатое. В индустриально развитых странах озон широко применяют в химической и нефтехимической, металлургической, электронной, целлюлозно-бумажной, лакокрасочной, микробиологической, пищевой промышленности, а также в машиностроении, сельском хозяйстве, медицине и коммунальном хозяйстве. Известно, что образующиеся при хлорировании воды побочные продукты являются токсичными веществами и не могут быть полностью удалены из питьевой воды. При озонировании, в отличие от хлорирования, протекают такие реакции окисления, при которых образуются нетоксичные конечные соединения. Эти соединения легко удаляются с помощью фильтрации [1].

Разработка более эффективного способа электросинтеза позволит повысить выход озона, КПД, устранить нагрев диэлектрического барьера и облегчить процесс подготовки воздуха перед подачей в ГО, что позволит упростить технологическую схему электросинтеза озона и расширить сферу его использования.

Кроме известных технологических процессов с использованием озона интерес представляет применение озона в теплицах для обеззараживания поливной воды, борьбы с вредителями, болезнями растений, гнилостными бактериями и спорами и пр.

Методика исследования

В существующих устройствах электросинтеза озона применяют синусоидальные напряжения частотой 500 Гц. При питании генератора озона от источника синусоидальной ЭДС ток i в цепи имеет сложный гармонический состав. Усредненная кривая мгновенного значения тока i содержит разрывы (рис. 1) в моменты возникновения разряда. Разряд на периоде питающего напряжения u дважды возникает и прекращается.

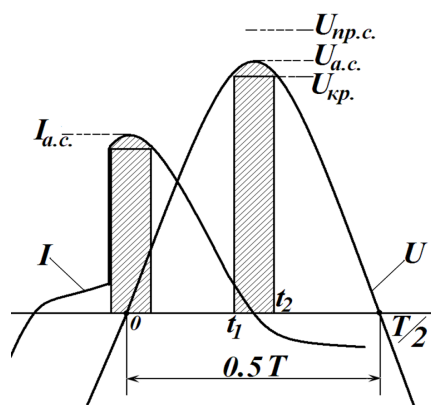


Рис. 1. Усредненные кривые мгновенного значения синусоидального напряжения и тока через генератор озона
Fig. 1. Mediated curves of the instantaneous value of the sinusoidal voltage and current through the ozone generator

Существование разряда возможно, если рабочее напряжение $U_{a.c.}$ на озонаторе превышает некоторое минимальное напряжение $U_{кр.}$. При этом $U_{a.c.}$ выбирается меньше, чем напряжение полного электрического пробоя разрядного промежутка. При питании синусоидальным напряжением происходит нагревание диэлектрического барьера, что приводит к снижению выхода озона. Поэтому в генераторах озона предусматривается охлаждение проточной водой электрода, покрытого барьером [1].

Проанализируем процесс электросинтеза озона при питании синусоидальным напряжением с использованием известной теории синусоидальных токов с подстановкой параметров, соответствующих процессу барьерного разряда [2]. Общая мощность цепи питания генератора озона (ГО) равна

$$P_{общ} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt \right)^{0.5} \times \left(\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt \right)^{0.5}. \quad (1)$$

Мощность цепи во время барьерного разряда

$$P_{раз} = \left(\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} u^2 dt \right)^{0.5} \times \left(\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} i^2 dt \right)^{0.5}. \quad (2)$$

В уравнениях (1) и (2)

$$u = U_{a.c.} \sin(\omega_c t - 0.5), \quad (3)$$

$$i = I_{a.c} \sin \omega_c t, \quad (4)$$

где ω_c – угловая частота синусоидального напряжения; u, i – мгновенные значения тока и напряжения; $U_{a.c.}$ – амплитуда синусоидального напряжения; $I_{a.c.}$ – амплитуда тока разряда; T – период синусоидального напряжения; t_1 – время начала разряда; t_2 – время завершения разряда.

Мощность потерь равна

$$P_{пот} = P_{общ} - P_{пот}. \quad (5)$$

Из анализа формул (1–5) следует, что значительная мощность потерь приходится на время, при котором разряд в ГО отсутствует. Отсюда следует рабочая гипотеза: повысить эффективность процесса электросинтеза озона можно при использовании периодических импульсов напряжения, имеющих форму, схожую с заштрихованной областью синусоидального напряжения, т.е. прямоугольную с большой скважностью (рис. 2). В данном случае можно повысить

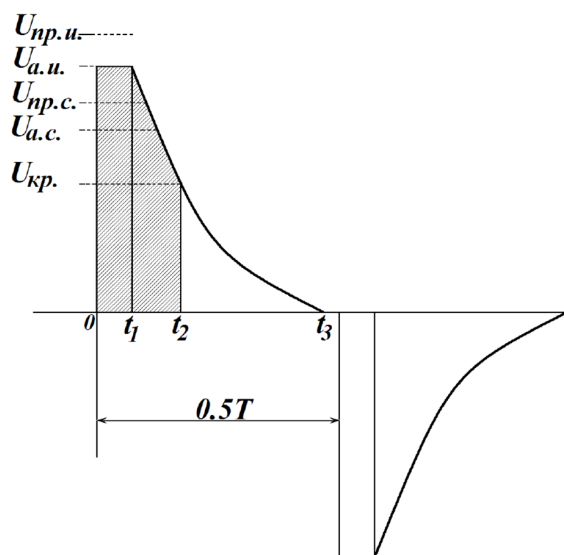


Рис. 2. Процесс изменения напряжения в разрядном промежутке при питании периодическими импульсами напряжения

Fig. 2. The process of changing the voltage in the discharge gap when powered by periodic voltage pulses

амплитуду питающего напряжения $U_{u.a}$ выше пробивного порога синусоидального напряжения $U_{np.c.}$, что характеризуется коэффициентом перенапряжения [3, 4].

$$K = U_{u.a} / U_{np.c.} \quad (6)$$

При импульсном питании емкость ГО заряжается до амплитудного значения напряжения, которое выше амплитуды синусоидального напряжения. В промежутке времени $0 - t_1$ (рис. 2) мощность разряда определяется зависимостью

$$P_{0-t_1} = I_{a.u.} \cdot U_{a.u.} \quad (7)$$

В паузе между импульсами (время от t_1 до t_2) мощность разряда будет определяться зарядом, накопленном в емкости ГО. Заряд будет разряжаться на сопротивлении потерь $R_{\text{пот}}$ ГО, сопротивлении $R_{\text{обм}}$ и индуктивности L вторичной обмотки повышающего трансформатора, которые являются элементами колебательного контура (рис. 3). При этом ввиду того,

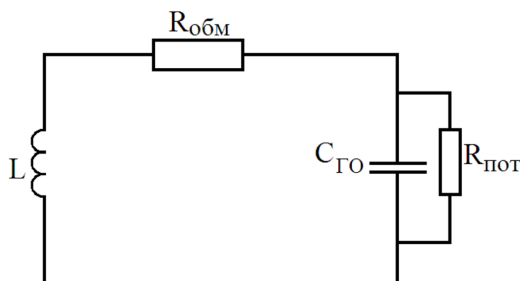


Рис. 3. Схема замещения цепи питания разрядного промежутка генератора озона в паузе между импульсами

Fig. 3. Diagram of replacement of the power supply circuit of the ozone generator discharge gap during the pause between pulses

что $R/2L < (CL)^{0.5}$ [2], в контуре имеем малое затухание, которое складывается из токов потерь на $R_{\text{пот}}$ (первое слагаемое правой части уравнения) и процесса в контуре $R_{\text{обм}}LC_{\text{ГО}}$:

$$P_{t1-t2} = \frac{U_{a.u}^2}{R_{\text{пот}}} e^{-\frac{2t}{R_{\text{пот}}C_{\text{ГО}}}} + \frac{U_{a.u}^2}{R_{\text{обм}}} e^{-\frac{tR_{\text{обм}}}{2L}} \left(\cos \omega_{\text{к.к}} t + \frac{R_{\text{обм}}}{2\omega_{\text{к.к}}} \sin \omega_{\text{к.к}} t \right). \quad (8)$$

В формуле (8) угловая частота $\omega_{\text{к.к}}$ колебательного контура определяется соотношением

$$\omega_{\text{к.к}} = \left(\frac{R_{\text{обм}}^2}{4L^2} - \frac{1}{LC_{\text{ГО}}} \right)^{0.5}. \quad (9)$$

Начиная с момента времени t_2 напряжение разрядного промежутка снижается ниже критического $U_{\text{кр}}$, разряд прекращается, и емкость разряжается на $R_{\text{обм}}$, что составляет мощность потерь

$$P_{t2-t3} = \frac{U_{a.u}^2}{R_{\text{обм}}} e^{-\frac{tR_{\text{обм}}}{2L}} \left(\cos \omega_{\text{к.к}} t + \frac{R_{\text{обм}}}{2\omega_{\text{к.к}}} \sin \omega_{\text{к.к}} t \right). \quad (10)$$

Анализ уравнений (7–10) показывает, что основная часть энергии периодических импульсов напряжения расходуется на процесс разряда, который сопровождается электросинтезом озона.

В схемах питания генераторов озона высоким напряжением активное сопротивление вторичной обмотки повышающего трансформатора может быть в пределах от 2 до 20 кОм, индуктивность от 50 до 200 Гн, емкость генераторов озона 10^{-7} до 10^{-9} Ф. В этом случае выполняется условие $(R_{\text{обм}}/2L) < (LC)$ и в контуре разряд протекает с малым затуханием. Для перевода контура в режим критического затухания параллельно ГО можно включить конденсатор емкостью, превышающей емкость ГО, что позволит повысить частоту периодических импульсов напряжения и, соответственно, энергетические показатели процесса электросинтеза озона.

В существующих устройствах генерирования озона используется барьерный эффект. Он заключается в том, что в озонаторе имеется диэлектрический слой, или, как его часто называют, барьер, который стабилизирует разрядный ток и придает разряду равномерный характер [1]. Мы считаем, что данное утверждение не совсем обосновано, по утверждению ряда авторов при электрических самостоятельных разрядах в газах одновременно происходят процессы зарядки, рекомбинации и переноса объемных зарядов, и при этом амплитуда и частота токов разряда являются случайными величинами и изменяются в больших пределах [3, 4], отсюда стабилизационная способность барьера сомнительна.

Наличие диэлектрического барьера обуславливает питание озонатора переменным электрическим током. В качестве диэлектрика при изготовлении озонаторов обычно применяют стекло. По числу диэлектрических барьеров озонаторы можно разделить на два типа: одни имеют два диэлектрических барьера (цельностеклянные), разряд в которых происходит между двумя диэлектриками; у других озонаторов один диэлектрический барьер [1, 5].

По форме электродов различают трубчатые и пластинчатые озонаторы. Для работы озонаторов это различие не принципиально, хотя в последнем случае бывает труднее избежать некоторых краевых эффектов.

Наиболее широко применяются трубчатые озонаторы, которые состоят из пакета трубчатых электродов, размещенных в общем цилиндрическом корпусе. Трубчатый озонатор представляет собой двухслойный конденсатор, электрическое поле в котором создается между двумя цилиндрическими поверхностями с общей осью (рис. 4) и имеет радиальное направление.

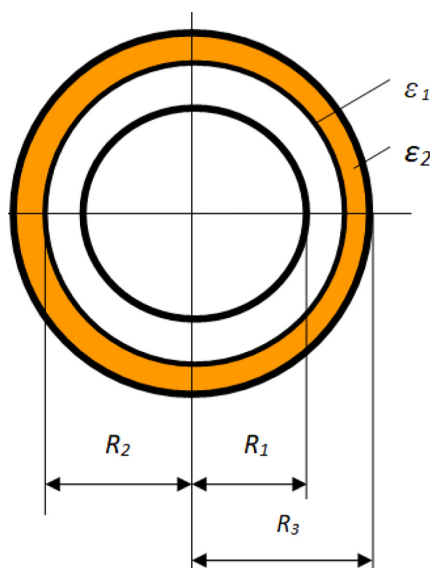


Рис. 4. Параметры цилиндрического генератора озона: ϵ_1 – относительная диэлектрическая проницаемость газового разрядного промежутка; ϵ_2 – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрического барьера; R_1 – наружный радиус внутреннего электрода; R_2 – внутренний радиус диэлектрического барьера; R_3 – внутренний радиус наружного электрода

Fig. 4. Parameters of the cylindrical ozone generator: ϵ_1 – relative dielectric permittivity of the gas discharge gap; ϵ_2 – relative dielectric permittivity of the dielectric barrier; R_1 – external radius of the internal electrode; R_2 – internal radius of the dielectric barrier; R_3 – internal radius of the external electrode

В силу симметрии равнопотенциальные поверхности имеют цилиндрическую форму; оси этих поверхностей совпадают с общей осью электродов, причем во всех точках одной и той же равнопотенциальной поверхности величина напряженности постоянна и уменьшается от одной равнопотенциальной поверхности к другой.

Для определения емкости такого конденсатора и напряженности электрического поля в каждом диэлектрике представим себе, что вдоль поверхности раздела двух диэлектриков мы поместили бесконечно тонкий металлический цилиндр [2]. Такой металлический цилиндр не искажает электрическое поле в каждом диэлектрике, так как поверхность раздела остается равнопотенциальной (всякая проводящая поверхность в электрическом поле равнопотенциальна).

В этом случае емкость газового промежутка будет равна:

$$C_1 = 2\pi\ell\epsilon_0\epsilon_1 (\ln R_2 / R_1), \quad (11)$$

где ℓ – длина конденсатора, м; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная.

Емкость диэлектрического барьера

$$C_2 = 2\pi\ell\epsilon_0\epsilon_2 (\ln R_3 / R_2), \quad (12)$$

Емкость последовательно включенных конденсаторов

$$C = C_1 C_2 / (C_1 + C_2) \quad (13)$$

Напряженность электрического поля цилиндрического конденсатора

$$E = Q / \epsilon_0 \epsilon 2\pi R \ell, \quad (14)$$

где R – радиус равнопотенциальной поверхности, для которой определяется напряженность электрического поля.

Так как при последовательном включении конденсаторов заряды на всех обкладках одинаковы по величине, то

$$Q = C_1 U_1 = C_2 U_2 = CU. \quad (15)$$

Отсюда можно определить напряженность электрического поля в каждом слое конденсатора. Напряженность электрического поля в слое газа

$$E_1 = CU / \epsilon_0 \epsilon_1 2\pi R_{\epsilon 1} \ell, \quad (16)$$

где $R_{\epsilon 1}$ – радиус равнопотенциальной поверхности в слое газа, для которой определяется напряженность электрического поля.

Напряженность электрического поля в слое барьера

$$E_2 = CU / \epsilon_0 \epsilon_2 2\pi R_{\epsilon 2} \ell, \quad (17)$$

где $R_{\epsilon 2}$ – радиус равнопотенциальной поверхности в слое барьера, для которой определяется напряженность электрического поля.

Результаты исследований

Для проведения числового анализа используем генератор озона с параметрами: $R_1=0.011\text{ м}$; $R_2=0.017\text{ м}$; $R_3=0.02\text{ м}$; $\varepsilon_1=1$; $\varepsilon_2=7$. Параметры синусоидального и импульсного напряжений приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры синусоидального и импульсного напряжений, использованных в экспериментальных исследованиях

Table 1. Parameters of sinusoidal and impulse voltages used in experimental studies

Параметры	Синусоидальное 50 Гц	Импульсное 100 Гц
Действующее напряжение, кВ	9,4	4,12
Амплитуда напряжения, кВ	13,5	20,6
Ток разряда, мА	1,5	6,8
Коэффициент амплитуды	1,41	5

Таблица 2. Результаты расчетов влияния параметров диэлектрического барьера на электрические параметры генератора озона

Table 2. Results of calculations of the influence of the dielectric barrier parameters on the electrical parameters of the ozone generator

Определяемый параметр	Обозначение	Используемая формула	Значение параметра
1. Емкость газового слоя ГО, 10^{-11} Ф	C_1	(11)	5.1
2. Емкость диэлектрического слоя, 10^{-10} Ф	C_2	(12)	9.57
3. Общая емкость ГО с барьером, 10^{-11} Ф	C	(13)	5.03
5. Радиус равнопотенциальной поверхности в слое газа, м	R_{e1}	$(R_1+R_2)/2$	0.014
6. Радиус равнопотенциальной поверхности барьера, м	R_{e2}	$(R_3+R_2)/2$	0.0185
7. Радиус равнопотенциальной поверхности конденсатора без барьера, м	R_{66}	$(R_3+R_1)/2$	0.0155
8. Напряженность электрического поля в слое газа, кВ/м	E_1	(16)	873* 1332**
9. Напряженность электрического поля в барьере, кВ/м	E_2	(17)	94* 144**

Примечание: * – параметры для синусоидального напряжения; ** – параметры для импульсного напряжения

В расчетах использовались амплитудные значения синусоидальных и импульсных напряжений. Это связано с тем, что процессы разряда происходят на узком участке напряжений, прилегающем к их амплитудам. Результаты расчетов приведены в табл. 2, анализ которых показывает, что наличие диэлектрического барьера значительно повышает напряженность электрического поля в слое газа, что способствует процессу электросинтеза озона.

Выводы

Использование импульсных напряжений большой скважности позволит устранить такие недостатки существующих генераторов озона, как нагрев и необходимость охлаждения диэлектрического барьера, повысить их эксплуатационную надежность и выход озона.

При питании разрядных промежутков ГО периодическими импульсами значительно снижаются потери мощности по сравнению с синусоидальным напряжением. Повышается выход озона за счет превышения амплитуды импульсного напряжения. Неотъемлемым условием эффективной работы ГО является необходимость полной разрядки емкости разрядного промежутка, что устранит процесс перезарядки емкости, сопровождаемый потерями энергии и нагревом барьера.

Список литературы / References

- [1] Филиппов Ю.В., Бобликов В.А., Пантелеев В.И. *Электросинтез озона*. М., 1987. 237 с. [Filippov Yu.V., Boblikov V.A., Pantelev V.I. *Ozone Electrosynthesis*. Moscow, 1987. 237 p. (in Russian)]
- [2] Демерчан К.С., Нейман А.Р., Коровкин Н.В., Чепурия В.П. *Теоретические основы электротехники*. Т. 2. М., 2006. 575 с. [Demerchan K.S., Neiman A.R., Korovkin N.V., Chepuriia V.P. *Theoretical Foundations of Electrical Engineering*. Vol. 2. Moscow, 2006. 575 p. (in Russian)]
- [3] Королев Ю.Д., Месяц Г.А. *Физика импульсного пробоя газов*. М., 1991. 224 с. [Korolev Yu.D., Mesyats G.A. *Physics of Pulsed Breakdown of Gases*. Moscow, 1991. 224 p. (in Russian)]
- [4] *Техника высоких напряжений: учеб. пособие для ВУЗов / под общ. ред. М.В. Костенко*. М., 1993. 528 с. [*High-Voltage Engineering: Textbook for Universities / ed. by M.V. Kostenko*. Moscow, 1993. 528 p. (in Russian)]
- [5] Лунин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н. *Физическая химия озона*. М., 1998. 215 с. [Lunin V.V., Popovich M.P., Tkachenko S.N. *Physical Chemistry of Ozone*. Moscow, 1998. 215 p. (in Russian)]

Theoretical and Applied Heat Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: UKIUGL

УДК 532.13

Rapid Viscosity Measurement of Oilfield Fluids Using a Microfluidic Chip with Radial Microchannels

Viktor F. Muratov,
Maksim I. Pryazhnikov*, Andrey I. Pryazhnikov,
Anton S. Yakimov and Elizaveta N. Volchenko
Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation

Received 16.02.2026, received in revised form 18.04.2026, accepted 19.05.2026

Abstract. This paper presents the results of experimental viscosity determination of oilfield fluids using a microfluidic chip with radial channels fabricated by an original technology. The method is based on the hydraulic resistance principle, where the test fluid and a reference fluid are simultaneously introduced into the chip at equal volumetric flow rates and distributed through an array of identical channels. The relative viscosity is determined by the ratio of the number of channels filled by each fluid, which eliminates the need for calibration. A custom chip topology optimized for the analysis of oilfield fluids has been proposed and implemented. Distilled water and aqueous glycerol solutions with known viscosity were used as reference fluids. Three oil samples differing in density and viscosity were investigated. It is shown that the proposed chip configuration enables rapid analysis with small sample volumes. The viscosity measurements obtained using the microfluidic method are in good agreement with the data from rotational rheometry. It is shown that the developed microfluidic viscometer with radial channels is a promising tool for rapid viscosity monitoring of oilfield fluids.

Keywords: oilfield fluids, oil, viscosity, microfluidic viscometer, microfluidic chip, experiment, rapid analysis.

Acknowledgements. This study was supported in part by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FSRZ-2020–0012).

Citation: Muratov V.F., Pryazhnikov M.I., Pryazhnikov A.I., Yakimov A.S., Volchenko E.N. Rapid Viscosity Measurement of Oilfield Fluids Using a Microfluidic Chip with Radial Microchannels. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(5), 575–586. EDN: UKIUGL



Экспресс-определение вязкости нефтепромысловых жидкостей с использованием микрофлюидного чипа с радиальными микроканалами

**В. Ф. Муратов, М. И. Пряжников,
А. И. Пряжников, А. С. Якимов, Е. Н. Волченко**
*Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментального определения вязкости нефтепромысловых жидкостей с использованием микрофлюидного чипа с радиальными микроканалами, изготовленного по оригинальной технологии. Метод основан на принципе гидравлического сопротивления, где исследуемая и реперная жидкости одновременно подаются в микрофлюидный чип при равных объемных расходах, распределяются по массиву идентичных микроканалов. При этом относительная вязкость определяется отношением количества каналов, заполненных каждой из жидкостей, что исключает необходимость калибровки. Предложена и реализована собственная топология чипа, оптимизированная для анализа нефтепромысловых жидкостей. В качестве реперных жидкостей использованы дистиллированная вода и водные растворы глицерина с известной вязкостью. Исследованы три образца нефти, различающиеся плотностью и вязкостью. Показано, что предложенная конфигурация чипа позволяет выполнять экспресс-анализ при малом объеме пробы. Результаты измерения вязкости, полученные микрофлюидным методом, хорошо согласуются с данными ротационной реометрии. Показано, что разработанный микрофлюидный вискозиметр с радиальными микроканалами является перспективным инструментом для экспресс-контроля вязкости нефтепромысловых жидкостей.

Ключевые слова: нефтепромысловые жидкости, нефть, вязкость, микрофлюидный вискозиметр, микрофлюидный чип, эксперимент, экспресс-анализ.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSRZ-2020–0012).

Цитирование: Муратов В. Ф. Экспресс-определение вязкости нефтепромысловых жидкостей с использованием микрофлюидного чипа с радиальными микроканалами / В. Ф. Муратов, М. И. Пряжников, А. И. Пряжников, А. С. Якимов, Е. Н. Волченко // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(5). С. 575–586. EDN: UKIUGL

Введение

Измерение вязкости жидкостей является одной из фундаментальных задач в современной науке и технике, поскольку она определяет гидродинамическое поведение среды. Контроль вязкости необходим для решения прикладных задач в различных отраслях. Так, например, в медицине анализ вязкости крови помогает диагностировать патологии кровообращения и оценивать риски тромбообразования [1]. В фармацевтике этот параметр влияет на эффективность лекарственных форм с контролируемым высвобождением активных веществ [2]. В материаловедении вязкость определяет демпфирующие свойства композитов и эластомеров [3], а в аддитивных технологиях – поведение материалов при 3D-печати и качество получаемых изделий [4]. В пищевой промышленности вязкость напрямую влияет на текстуру и стабильность таких продуктов, как эмульсии, пены и гели [5]. Наконец, в нефтегазовой отрасли знание реологии

буровых растворов и высоковязких нефтей помогает моделировать процессы добычи и транспортировки углеводородов [6].

Традиционные методы измерения вязкости, такие как ротационные вискозиметры с системой и капиллярные вискозиметры, на протяжении десятилетий оставались отраслевым стандартом. Первые позволяют исследовать широкий спектр реологических кривых, однако требуют больших объемов пробы (от нескольких единиц до пары сотен миллилитров), длительного времени анализа (до одного часа на образец), процедуры очистки, а также участия квалифицированного оператора. Капиллярные вискозиметры, хотя и более просты в обращении, преимущественно применимы к ньютоновским жидкостям и также не лишены проблем с предварительной калибровкой. Оба подхода демонстрируют недостаточную чувствительность при работе с малыми объемами (менее миллилитра) и не всегда позволяют проводить экспресс-анализ в условиях, требующих высокой повторяемости и минимального вмешательства человека.

В последние годы в качестве альтернативного направления активно развиваются микрофлюидные вискозиметры [7]. Их преимущество, обусловленное масштабированием, заключается в снижении необходимого объема для анализа (от нескольких десятков нанолитров до нескольких сотен микролитров), существенном сокращении времени измерения (до минуты и менее), отсутствии нужды в промежуточной очистке, а также возможности совмещения с другими аналитическими модулями непосредственно на одном чипе («лаборатория на чипе»).

Среди микрофлюидных вискозиметров можно выделить несколько основных типов. Так, в вискозиметрах на основе ламинарного сонаправленного течения определяют отношение вязкостей образца и референсной жидкости по ширине границы раздела. Такие устройства позволяют проводить анализ при высоких скоростях сдвига, достигая чувствительности менее 0,1 мПа·с при объеме пробы от 10 мкл [8, 9].

Для ньютоновских жидкостей особенно эффективны капиллярные микрофлюидные вискозиметры, в которых измеряют время либо расход протекания жидкости через микроканал с известной геометрией. Однако точность измерений зависит от тщательного контроля смачиваемости поверхности и профиля давления [7, 10].

Принцип работы ротационных микрореометров основан на миниатюризации традиционных систем «конус–плита» и «плита–плита» за счет применения электростатических и пьезоэлектрических управляющих элементов. Такие приборы позволяют точно измерять свойства жидкостей при микрообъемах (1–10 мкл), но их встраивание в микрочипы требует решения ряда инженерных задач [11].

В настоящей работе использовался подход к определению вязкости, основанный на микрофлюидном чипе «веерной» топологии [12]. Суть подхода заключается в следующем. В микрофлюидный чип одновременно подаются исследуемая и реперная жидкости, причем репером служит среда с известной и постоянной вязкостью (обычно ньютоновская жидкость). Обе жидкости вводятся в микрофлюидный чип при заданных объемных расходах, которые в наиболее простом варианте реализации устанавливаются одинаковыми. На входе имеется прямой канал, затем жидкость попадает в расширяющийся участок «веер», спроектированный достаточно широким для минимизации пристеночных эффектов. Далее потоки перераспределяются по массиву идентичных радиальных микроканалов одинаковой длины и поперечного сечения.

Ключевая идея заключается в том, что гидравлическое сопротивление всего массива каналов специально делается намного больше сопротивления входного и выходного участков. В этом случае перепад давления на пути, занятом исследуемой жидкостью, и на пути, занятом реперной жидкостью, оказывается практически одинаковым. При условии равных объемных расходов обеих сред количество микроканалов, заполнившихся образцом и репером, оказывается строго связано с отношением их вязкостей. Таким образом, процедура измерения сводится к получению фотографии микрофлюидной веерной структуры и визуальному подсчету каналов, занятых каждой из жидкостей, без необходимости калибровки, интегрированных датчиков давления или сложной обработки изображений.

Целью данной работы является оценка применимости микрофлюидного вискозиметра веерообразной топологии для измерения вязкости нефтепромысловых жидкостей (образцы нефти). В настоящем исследовании представлены экспериментальные данные, демонстрирующие возможности и ограничения данного подхода.

Теоретическая часть

Микрофлюидный вискозиметр веерной топологии (с радиальными каналами) предназначен для измерения относительной вязкости жидкостей без прямого измерения давления и сложной калибровки. Метод основан на гидродинамическом перераспределении двух параллельных потоков (исследуемого и реперного) в массиве идентичных микроканалов [12].

Используемый микрофлюидный вискозиметр состоит из трех последовательных областей. Для параллельной подачи исследуемой и реперной жидкостей с заданными объемными расходами (как правило, равными) имеется входной канал. Входной участок переходит в расширяющийся веерный участок, обеспечивающий равномерное распределение потоков. После этого потоки жидкостей попадают в массив радиальных идентичных микроканалов одинаковой длины и поперечного сечения.

Течение в микрофлюидных системах характеризуется малыми размерами каналов (10–500 мкм) и низкими скоростями, что приводит к доминированию вязких сил над инерционными. Число Рейнольдса в таких условиях составляет менее единицы, что соответствует строго ламинарному режиму течения. Известно, что для прямоугольного канала шириной w , высотой h и длиной L гидравлическое сопротивление описывается выражением:

$$R = \frac{\Delta p}{Q} = \frac{12\mu L}{wh^3} \left[1 - \frac{192h}{\pi^5 w} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^5} \tanh\left(\frac{n\pi w}{2h}\right) \right]^{-1}.$$

Это выражение можно записать в компактной форме $R = C \cdot \mu$, где геометрический фактор C зависит только от размеров канала. Для каналов с большим отношением сторон ($w \gg h$, случай плоской щели) формула упрощается:

$$R \approx \frac{12\mu L}{wh^3}.$$

При выполнении условия, что сопротивление массива радиальных микроканалов значительно превосходит сопротивления входного и выходного участков, перепад давления в микрофлюидном чипе определяется исключительно массивом каналов. Приравнявая перепады давления на путях, занятых образцом и репером, пренебрегая вкладами входного и выходно-

го участков и учитывая равенство расходов жидкостей, получаем упрощенную формулу для относительной вязкости жидкостей (отношение вязкости исследуемого образца к вязкости репера):

$$\mu_r = \frac{\mu_{\text{образец}}}{\mu_{\text{репер}}} \approx \frac{N_{\text{образец}}}{N_{\text{репер}}}.$$

Таким образом, относительная вязкость определяется простым подсчетом числа микроканалов, заполненных исследуемой и реперной жидкостями. Для обеспечения высокой точности общее число каналов должно быть достаточно велико (несколько десятков или сотен), а их геометрия строго идентична [12].

Методы исследования

В данной работе были использованы ньютоновские жидкости разной вязкости. В качестве нефтепромысловых жидкостей применялись три образца нефти, отличающиеся по плотности и вязкости. Реперными жидкостями выступали дистиллированная вода, водные растворы глицерина. Плотность жидкостей была измерена пикнометрическим методом. Параметры плотности и вязкости жидкостей представлены в табл. 1.

Динамическая вязкость жидкостей была измерена при 25 °С с помощью ротационного реометра Anton Paar MCR 302e. Диапазон измерения крутящего момента реометра составляет от 1 нН·м до 230 мН·м. Реометр оснащен системой контроля температуры, работающей на основе элементов Пельтье. Помимо этого, для измерения вязкости воды использовался капиллярный вискозиметр ВПЖ-2. Данные, полученные на реометре, использовались для сравнения с результатами микрофлюидного исследования. Каждая жидкость была измерена трижды, результаты усреднены. Относительная погрешность составила менее 2 %.

Проведены микрофлюидные исследования по оценке вязкости с помощью микрофлюидного вискозиметра (см. рис. 1). Конструкция микрофлюидного вискозиметра следующая. Расстояние от центральной точки, из которой расходятся радиальные микроканалы, до их оконечности составляет 9 мм. Ширина вертикального входного канала, в свою очередь, составляет 200 мкм. Глубина каналов всерного вискозиметра составляет (65–70 мкм). Красная область канала, выделенная на рис. 1а, обозначает участок, где на второй половине технологического этапа посредством фрезерной обработки оргстекла была создана канализиро-

Таблица 1. Характеристики используемых жидкостей

Table 1. Characteristics of the liquids used

Жидкость	Плотность, кг/м ³	Вязкость, мПа·с
Вода	997,0	0,891
Водный раствор глицерина «10сР»	1154	9,49
Водный раствор глицерина «50сР»	1208	50,9
Образец нефти «К»	803,7	4,99
Образец нефти «I»	874,0	48,2
Образец нефти «Vn»	901,3	75,3

ванная поверхность. Полученный канал имеет ширину и глубину до 1 мм, что обеспечивает равномерное истечение выходящей жидкости из чипа для всех лучей, характерных для данного типа вискозиметра.

Микрофлюидный чип изготавливали методом фотолитографии с последующим плазменно-химическим травлением. Топологию загружали в установку Heidelberg DWL 66+ и экспонировали на кремниевой пластине (диаметр 100 мм) с фоторезистом. После проявления на структуру наносили слой хрома (≈ 100 нм) в качестве защитной маски, затем удаляли фоторезист с хромом обработкой в диметилсульфоксиде с ультразвуком и струей растворителя. Сформированную хромовую маску использовали для анизотропного реактивного ионного травления на установке Oxford PlasmaLab System 100 до глубины 65–70 мкм (рис. 16).

В ходе дальнейшей технологической последовательности с подготовленной кремниевой пластины был снят оттиск, который, в свою очередь, послужил основой для изготовления силиконовой мастер-формы. Данная мастер-форма после ее полного изготовления применялась для литья итогового чипа из эпоксидной смолы. Следует отметить, что чип выполнен двусоставным и конструктивно включает в себя две функциональные зоны. Первая из них представляет собой рабочую область, содержащую систему расходящихся лучей, отвечающую за непосредственное измерение вязкости. Вторая зона это канал, обозначенный на рис. 1а красным цветом, который обеспечивает организованный отток выходящей жидкости из чипа. Для формирования именно этого канала оттока отдельно создавалась специализированная силиконовая мастер-форма, соответствующая конфигурации красной области, представленной на рис. 1а, и впоследствии именно она использовалась при отливке соответствующей составной части чипа. Таким образом, раздельное изготовление мастер-форм для рабочей области и для канала оттока позволило реализовать модульный подход к производству двусоставной микрофлюидной структуры.

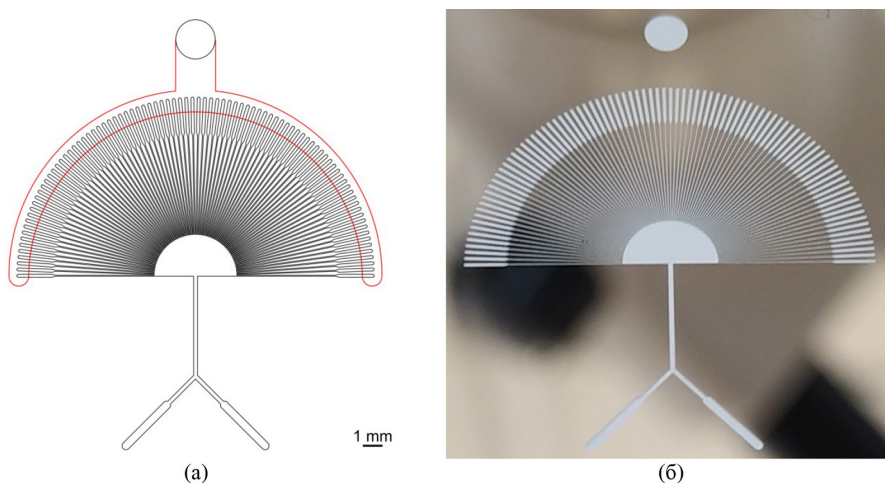


Рис. 1. Топология микрофлюидного вискозиметра: а) схематичное изображение топологии (красным цветом изображен канализированный слой, наносимый на герметизирующую пластинку); б) изготовленный чип на кремниевой мастер-форме

Fig 1. Topology of a microfluidic viscometer: a) schematic representation of the topology (the channelized layer applied to the sealing plate is shown in red); b) the manufactured chip on the silicon master mold

Технологический процесс изготовления чипа из эпоксидной смолы включает несколько стадий. Сначала готовят смесь эпоксидной смолы с отвердителем и заливают ее в мастер-формы, а также наносят на предметное стекло. Затем проводят частичную полимеризацию (35 мин при 80 °С) до резиноподобного состояния. После охлаждения до комнатной температуры в пластинке с канализированной структурой пробивают входные и выходные отверстия тупыми иглами, а две части чипа склеивают и фиксируют на стекле. Далее в отверстия монтируют тупые иглы (для герметичного подключения трубок, см. рис. 2а), а по периметру чип промазывают эпоксидной смолой для предотвращения протечек. Завершает процесс окончательная полимеризация в печи (80 °С, 40 мин). В результате получают герметичную и механически стабильную микрофлюидную систему для экспериментов по оценке вязкости жидкостей.

Исследования, проведенные с использованием микрофлюидного вискозиметра, позволили получить количественные данные о вязкости исследуемых жидкостей. Экспериментальная установка, представленная на рис 2б, включала в себя микрофлюидный чип, установленный горизонтально на предметном столике стереоскопического микроскопа NSZ-608, оснащенного цифровой камерой MC-20 для визуальной регистрации процесса. Подача жидкостей осуществлялась двухканальным шприцевым насосом LongerPump модели LSP02–2B с использованием двух шприцев Hamilton объемом 2,5 мл каждый. Перед экспериментом чип заполняли изопропиловым спиртом для удаления воздушных пузырьков, затем наполняли шприцы. В первый помещали исследуемый образец с неизвестной вязкостью, во второй – реперную жидкость. Отработанная смесь собиралась в емкость на выходе из чипа, а ход эксперимента фиксировался камерой MC20 в формате фото- и видеосъемки. Полученные изображения впоследствии обрабатывались с помощью специализированного программного обеспечения «Программа анализа эффективной вязкости для микрофлюидного верного реометра (FanFlowVisc)».

Разработанная программа анализа «FanFlowVisc» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, RU 2025695542) использовалась для автоматизированного анализа изображений потоков жидкостей в микрофлюидном чипе с радиальными микро-

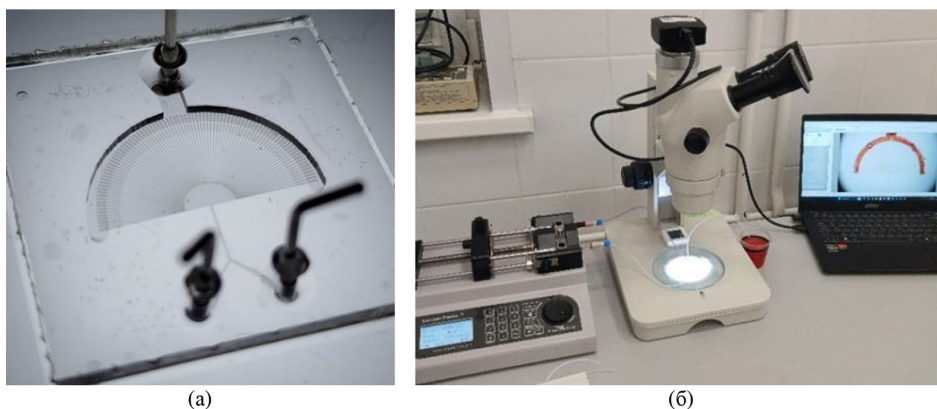


Рис. 2. Изготовленный микрофлюидный вискозиметр из эпоксидной смолы (а) и фотография экспериментальной установки (б)

Fig. 2. The fabricated microfluidic viscometer made of epoxy resin (a) and a photograph of the experimental setup (b)

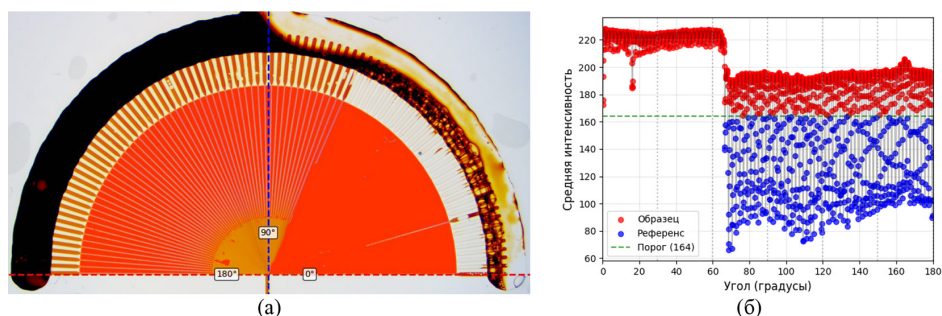


Рис. 3. Анализ микрофлюидного эксперимента: (а) фотография распределения образца нефти «Vn» и глицеринового раствора «50сР» с сегментированием областей при помощи порога цвета; (б) распределение средней интенсивности цвета от угла

Fig. 3. Analysis of the microfluidic experiment: (a) photograph of the distribution of the “Vn” oil sample and “50cP” glycerol with segmentation of regions using a color threshold; (b) distribution of the average color intensity from angle

каналами. Программа позволяла выполнить загрузку фотографий, после чего задавались центр и базовая линия отсчета. Алгоритм строил распределение интенсивности выбранного цветового канала (RGB или HSV) вдоль заданных радиальных линий. Полученные профили интенсивности цвета анализировались с использованием пороговой бинаризации, что позволяло сегментировать области, занятые каждой из жидкостей. Ключевым достоинством программы являлось автоматическое определение количества каналов, соответствующих образцу и реперной жидкости, и последующий расчет относительной вязкости без необходимости проведения калибровочных процедур. Типичное распределение интенсивности цвета представлено на рис. 3.

Результаты и их обсуждение

Проведены испытания микрофлюидного вискозиметра на различных образцах нефти. Все эксперименты выполнялись при равных объемных расходах исследуемой и реперной жидкостей и температуре 25 °C.

Визуализация границы раздела потоков не требовалась (за исключением случая, где в качестве исследуемой и реперной жидкости использовалась дистиллированная вода). На всех фотографиях жидкость (слева) соответствует исследуемому образцу, а неокрашенная (справа) – реперной жидкости.

В контрольном эксперименте в качестве исследуемой и реперной жидкостей использовалась дистиллированная вода. Исследуемую воду слегка подкрашивали для визуализации границы раздела.

На фотографии (рис. 4) видно, что подкрашенная вода (слева) и неокрашенная вода (справа) заполнили массив радиальных микроканалов примерно поровну. Поскольку вязкости обеих жидкостей одинаковы, а расходы равны, количество каналов, занятых каждой из жидкостей, разделилось симметрично относительно центра микрофлюидного чипа. Этот результат подтверждает корректную работу распределительной системы чипа, отсутствие перекосов при разделении потоков в верном участке и симметричность гидродинамической схемы в целом.

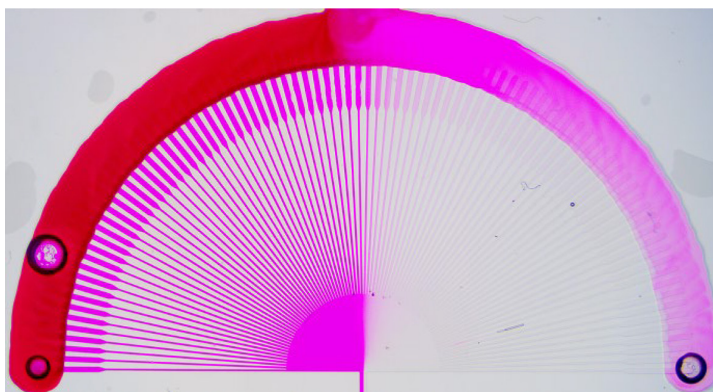


Рис. 4. Фотография массива индикаторных каналов для контрольного эксперимента «вода – вода». Исследуемая вода подкрашена (слева), реперная вода не окрашена (справа)

Fig. 4. Photograph of the indicator channel array for the control experiment «water – water». The test water is dyed (left), the reference water is uncolored (right)

Далее были измерены нефтепромысловые жидкости. В качестве первой исследуемой жидкости использовался образец нефти «К», динамическая вязкость которой при 25 °С составляет около 4,99 мПа·с. Для нее были проведены два эксперимента с реперными жидкостями, различающимися по вязкости.

В одном случае реперной жидкостью служила дистиллированная. Отношение вязкостей составляет $\mu_{\text{нефть}} / \mu_{\text{вода}} \approx 5,60$, то есть исследуемая нефть является более вязкой, чем репер. Результаты прокачивания в микрофлюидном вискозиметре представлены на рис. 5а. Образец нефти «К» (слева) заполнил значительно большее количество каналов по сравнению с неокрашенной водой. Граница раздела потоков смещена в сторону менее вязкой жидкости (воды), что соответствует теоретическому принципу, где при равных расходах более вязкая жидкость занимает больше параллельных микроканалов. Это смещение хорошо визуально различимо и составляет несколько десятков каналов.

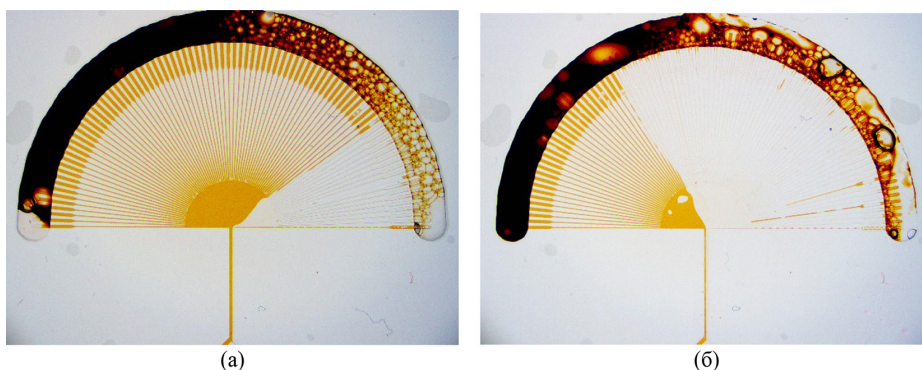


Рис. 5. Фотографии микрофлюидных чипов при анализе образца нефти «К» (слева) с разной реперной жидкостью: (а) вода (справа); (б) глицириновый раствор 10 мПа·с (справа)

Fig. 5. Photographs of microfluidic chips during analysis of oil sample «K» (left) with different reference fluids: (a) water (right); (b) glycerol solution 10 mPa·s (right)

Во втором эксперименте реперной жидкостью служил «водный раствор глицерина 10 сР» с вязкостью 9,49 мПа·с. Отношение вязкостей составляет $\mu_{\text{нефть}} / \mu_{\text{глиц}} \approx 0,526$, то есть теперь исследуемая нефть является менее вязкой, чем реперная жидкость (рис. 5б). В отличие от предыдущего случая, неокрашенный глицериновый раствор (справа) заполнил большее число каналов, чем подкрашенная нефть (слева). Более вязкая жидкость (глицерин) заняла больше каналов, что полностью согласуется с ожидаемым поведением. Граница раздела смещена в сторону менее вязкой нефти. Визуально наблюдается отчетливое преобладание правой (реперной) части массива радиальных микроканалов над левой.

Таким образом, для одного и того же образца нефти «К» при смене реперной жидкости с менее вязкой (вода) на более вязкую (глицериновый раствор 10 сР) направление смещения границы раздела меняется на противоположное, что качественно подтверждает работоспособность метода.

В следующей серии экспериментов в качестве исследуемых жидкостей использовались образцы нефти «I» и «Vn» с более высокими значениями вязкости. Реперной жидкостью в обоих случаях служил водный раствор глицерина «50 сП» с вязкостью около 50 мПа·с. Вязкость образца нефти «I» составляет 48,2 сП, вязкость реперного глицеринового раствора – около 50 сП. Отношение вязкостей $\mu_{\text{нефть}} / \mu_{\text{репер}} \approx 0,946$, то есть вязкости близки, причем реперная жидкость незначительно превосходит по вязкости исследуемый образец. На фотографии (см. рис 6а) видно, что распределение жидкостей в микроканалах оказалось близким к равномерному. Глицериновый раствор (справа) занимает несколько больше каналов, чем образец нефти (слева). Это ожидаемо, чем ближе вязкости исследуемой и реперной жидкостей, тем ближе распределение каналов к равномерному.

Вязкость образца нефти «Vn» составляет около 75 сП, вязкость реперного глицеринового раствора – около 50 сП. Отношение вязкостей $\mu_{\text{нефть}} / \mu_{\text{глиц}} \approx 1,48$. В этом случае исследуемая нефть является более вязкой, чем реперная жидкость. На микрофотографии (рис. 6б) показан массив индикаторных каналов. Подкрашенная нефть (слева) заполнила большее число каналов, чем неокрашенный глицериновый раствор (справа). Разница в заполнении умеренная, что соот-

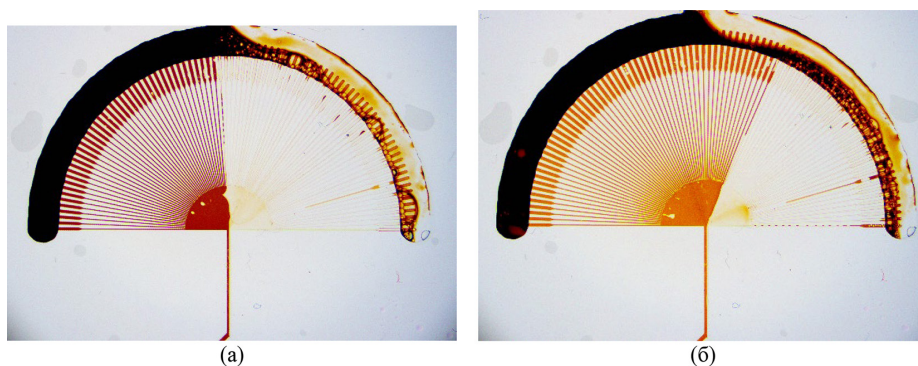


Рис. 6. Фотографии микрофлюидных чипов при анализе образцов нефти (слева) с реперной жидкостью «глицериновый раствор 50 мПа·с» (справа). (а) образец нефти «I» (≈ 45 мПа·с); (б) образец нефти «Vn» (≈ 75 мПа·с)

Fig. 6. Photographs of microfluidic chips during analysis of oil samples (left) with the reference fluid «glycerol solution 50 mPa·s» (right). (a) crude oil «I» (≈ 45 mPa·s); (b) crude oil «Vn» (≈ 75 mPa·s)

ветствует относительно небольшому различию вязкостей (в 1,5 раза). Граница раздела смещена в сторону менее вязкой реперной жидкости (глицерина).

В табл. 2 представлены сводные данные по всем проведенным экспериментам. Во всех случаях наблюдается прямая корреляция между относительной вязкостью жидкостей и распределением массива радиальных микроканалов, где более вязкая жидкость занимает большее число каналов. Контрольный эксперимент «вода–вода» подтвердил симметричность системы. Для образца нефти «К» показана возможность измерения как при большей вязкости образца относительно репера (случай с водой), так и при меньшей (случай с глицерином «10сР»). Для образцов нефти «I» и «Vn» с более высокой вязкостью продемонстрирована работа вискозиметра в диапазоне вязкостей от 48 до 75 мПа·с с единым репером («50сР»).

Количественное сравнение результатов, полученных на микрофлюидном вискозиметре, с эталонными значениями, измеренными на ротационном реометре Anton Paar MCR 302e, представлено в табл. 2. Максимальное отклонение составило 17,4 % для пары нефть «К» – вода»

Таблица 2. Результаты эксперимента

Table 2. Experimental results

Исследуемый образец – реперная жидкость	$\mu_{\text{чип}}$, мПа·с	Погрешность, %
вода– вода	0,89	-
нефть «К» – вода	4,12	17,4
нефть «К» – глицерин «10сР»	4,75	4,9
нефть «I» – глицерин «50сР»	46,6	3,3
нефть «Vn» – глицерин «50сР»	73,0	3,0

при пятикратном различии вязкостей исследуемой жидкости и реперной. Для пар с близкими значениями вязкостей (нефть «К» – глицерин «10 сП», нефть «I» – глицерин «50 сР») отклонение не превысило 5,0 %. Контрольный эксперимент «вода – вода» дал нулевое отклонение, что подтверждает симметричность системы. Таким образом, разработанный микрофлюидный вискозиметр обеспечивает приемлемую точность для экспресс-анализа нефтепромысловых жидкостей, особенно при различии вязкостей не более чем в 5 раз.

Заключение

В ходе работы разработан и изготовлен микрофлюидный вискозиметр всерной топологии с радиальными микроканалами, позволяющий определять относительную вязкость жидкостей по распределению потоков в массиве параллельных микроканалов. Экспериментальная проверка вискозиметра проведена на пяти парах жидкостей, включая контрольную пару «вода–вода», три образца нефти с вязкостью от 4,9 до 75 мПа·с и реперные жидкости на основе воды и водных растворов глицерина. Контрольный эксперимент с одной жидкостью (вода–вода) подтвердил симметричность распределительной системы чипа и отсутствие систематической ошибки. Сравнение с эталонными измерениями на ротационном реометре показало, что откло-

нение результатов вязкости образцов нефти на микрофлюидном вискозиметре не превышает 17 % при максимальном различии вязкостей (5:1) и менее 5 % при близких значениях вязкостей. Разработанный микрофлюидный вискозиметр может быть рекомендован для экспресс-анализа вязкости нефтепромысловых жидкостей, особенно в полевых условиях, благодаря простоте использования, малому объему пробы и отсутствию необходимости в калибровке.

Список литературы / References

- [1] Тихомирова И. А. Гемореология и микроциркуляция. *Физиология человека*, 2023, 54(1), 3–25. DOI: 10.31857/S 0301179823010071. EDN: GYCA YR [Tikhomirova I. A. Hemorheology and microcirculation. *Human Physiology*, 2023, 54(1), 3–25 (in Russian)]
- [2] Tousif Ayyub K., Moravkar K., Maniruzzaman M., Amin P. Effect of melt extrudability and melt binding efficiency of polyvinyl caprolactam polyvinyl acetate polyethylene glycol graft copolymer (Soluplus®) on release pattern of hydrophilic and high dose drugs. *Materials Science and Engineering: C*, 2019, 99, 563–574.
- [3] Tsimouri I. Ch., Caseri W., Hine P. J., Gusev A. A. Lightweight silicon and glass composites with submicron viscoelastic interlayers and unconventional combinations of stiffness and damping. *Composites Part B: Engineering*, 2024, 284, 111717.
- [4] Gasmi A., Guessasma M., Davidovits R., Pélegris C. Unveiling additive effects in 3D printed geopolymer composites: A multi-scale analysis coupling rheological insights and CFD-optimized deposition. *Journal of Manufacturing Processes*, 2025, 150, 445–460.
- [5] Salahi M. R., Mohebbi M. Design and characterization of low-acyl gellan gum–monoglyceride bigel-based foamed emulsions: Application as a solid fat substitute in an aerated bakery system. *Food Hydrocolloids*, 2026, 175, 112515.
- [6] Minakov A. V., Skorobogatova A. D., Lysakova E. I., Kazanina S. D., Pryazhnikov M. I. The effect of adding single-walled carbon nanotubes on the functional characteristics of drilling fluids with different hydrocarbon phase contents. *Diamond and Related Materials*, 2026, 163, 113344.
- [7] Gupta S., Wang W. S., Vanapalli S. A. Microfluidic viscometers for shear rheology of complex fluids and biofluids. *Biomicrofluidics*, 2016, 10(4).
- [8] Guillot P., Moulin T., Kötitz R., Guirardel M., Dodge A., Joanicot M., Colin A., Bruneau C.-H., Colin T. Towards a continuous microfluidic rheometer. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2008, 5(5), 619–630.
- [9] Kang Y. J., Yoon S. Y., Lee K.-H., Yang S. A Highly Accurate and Consistent Microfluidic Viscometer for Continuous Blood Viscosity Measurement. *Artificial Organs*, 2010, 34(11), 944–949.
- [10] Srivastava N., Davenport R. D., Burns M. A. Nanoliter Viscometer for Analyzing Blood Plasma and Other Liquid Samples. *Analytical Chemistry*, 2004, 77(2), 383–392.
- [11] Clasen C., Gearing B. P., McKinley G. H. The flexure-based microgap rheometer (FMR). *Journal of Rheology*, 2006, 50(6), 883–905.
- [12] Kang Y. J., Yang S. Integrated microfluidic viscometer equipped with fluid temperature controller for measurement of viscosity in complex fluids. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2013, 14(3–4), 657–668.

Theoretical and Applied Heat Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: WZJVAY

УДК 621.59

**Optimization of the Regasification Contour
of a Cryoprodukt Operating
on a Two-Cascade Renkin Cycle**

**Alexandra B. Shimanova^a, Dmitriy A. Uglov^a,
Viktoriya V. Karnaukh^{*b}, Dmitriy V. Sarmin^a,
Alexey L. Lopatin^a and Artem A. Shimanov^a**

*^aSamara National Research University
named after Academician S. P. Korolev
Samara, Russian Federation*

*^bTugan-Baranovsky Donetsk National University
of Economics and Trade
Donetsk, Russian Federation*

Received 11.11.2025, received in revised form 01.04.2026, accepted 19.05.2026

Abstract. The paper presents the results of an integrated study focused on optimizing the regasification loop of a cryogenic product (liquid air) for Cryogenic Energy Storage Systems (CESS) based on a dual-cascade closed Rankine cycle. The motivation for this research stems from the increasing importance of CESS for the integration of renewable energy sources and the imperative to improve the efficiency and economic viability of low-temperature power generation facilities. The principal scientific contribution of this work is the development and application of a Pareto-based multi-objective optimization framework for a complex two-circuit thermodynamic system. The research concurrently accounted for both thermodynamic performance metrics (such as power output, thermal and exergy efficiency) and an economic criterion (capital expenditure). This comprehensive methodology made it possible to identify plant configurations that are not only optimal from an energy standpoint but also justified from a technical and economic perspective. As part of the investigation, a detailed simulation model of the dual-cascade system was developed. This model encompassed thermodynamic analysis of key state points, energy balancing, heat exchanger sizing, and an exergo-economic analysis. The optimization algorithm, coded in Python, generated a Pareto front that effectively visualizes the compromise between the system's net power output and its capital cost.

Keywords: regasification, dual-cascade closed Rankine cycle, liquid air, Pareto front, Cryogenic Energy Storage System.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: karnaukh.vita0629@gmail.com

Acknowledgements. This work was supported by the Russian Ministry of Education and Science (Project No. FSSS-2024–0017).

Citation: Shimanova A. B., Uglov D. A., Karnaukh V. V., Sarmin D. V., Lopatin A. L., Shimanov A. A. Optimization of the Regasification Contour of a Cryoprodukt Operating on a Two-Cascade Renkin Cycle. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(5), 587–604. EDN: WZJVAY



Оптимизация контура регазификации криопродукта, работающего по двухкаскадному циклу Ренкина

А. Б. Шиманова^а, Д. А. Угланов^а, В. В. Карнаух^б,
Д. В. Сармин^а, А. Л. Лопатин^а, А. А. Шиманов^а

^аСамарский национальный исследовательский университет
им. акад. С. П. Королева

Российская Федерация, Самара

^бДонецкий национальный университет экономики и торговли
им. Михаила Туган-Барановского
Российская Федерация, Донецк

Аннотация. В работе представлены результаты комплексного исследования, направленного на оптимизацию контура регазификации криопродукта (жидкого воздуха) для криогенных систем накопления энергии (КСНЭ), работающего на основе двухкаскадного замкнутого цикла Ренкина. Актуальность работы обусловлена растущей ролью КСНЭ в контексте интеграции возобновляемых источников энергии и необходимостью повышения эффективности и экономичности низкотемпературных энергетических установок. Научная новизна исследования заключается в разработке и применении методологии многокритериальной оптимизации по Парето для сложной двухконтурной термодинамической системы. В работе одновременно учитывались термодинамические (мощность, термический и эксергетический КПД) и экономические (капитальные затраты) критерии эффективности. Это позволило выявить не просто энергетически оптимальные, но и технико-экономически обоснованные конфигурации установки. В ходе исследования была разработана детализированная расчетная модель двухкаскадной системы, включающая термодинамический анализ узловых точек, энергетический баланс, расчет теплообменных аппаратов и эксерго-экономический анализ. Оптимизационный алгоритм, реализованный на языке Python, позволил получить фронт Парето, отображающий компромисс между выходной мощностью и стоимостью установки.

Ключевые слова: регазификация, двухкаскадный закрытый цикл Ренкина, жидкий воздух, фронт Парето, криогенная система накопления энергии.

Благодарность. Результаты работы получены при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект № FSSS-2024–0017).

Цитирование: Шиманова А. Б. Оптимизация контура регазификации криопродукта, работающего по двухкаскадному циклу Ренкина / А. Б. Шиманова, Д. А. Угланов, В. В. Карнаух, Д. В. Сармин, А. Л. Лопатин, А. А. Шиманов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(5). С. 587–604. EDN: WZJVAY

Введение

Криогенные системы накопления энергии (КСНЭ) представляют собой технологии, использующие низкие температуры для хранения и преобразования энергии. Основным принципом их работы заключается в использовании криогенных жидкостей, таких как жидкий воздух или жидкий азот, для хранения энергии в виде потенциальной энергии при низких температурах. Они представляют собой перспективное направление в области энергетики, способствующее более эффективному использованию возобновляемых источников и обеспечению устойчивого энергетического будущего. Их развитие может сыграть ключевую роль в переходе к низкоуглеродным технологиям и улучшении энергетической безопасности. Это одна из многообещающих технологий для хранения энергии, особенно в контексте растущей доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергетическом балансе [1–3]. За последние десять лет интерес к данным технологиям возрос как в России, так и за рубежом, что связано с необходимостью повышения устойчивости энергосистем и снижения углеродных выбросов. Развитие отрасли потребления криопродуктов требует разработки технологий, использующих их теплоотводящую способность. Энергоэффективность применения жидких криопродуктов повышается при использовании теплоотводящей способности для производства побочных ресурсов (электроэнергии, сжиженных компонентов воздуха и др.). Производство в качестве побочного продукта электроэнергии является универсальным решением энергосбережения. Криогенный аккумулятор представляет собой систему накопления энергии, которая состоит из ожижителя газа, емкости для хранения жидкого криопродукта и контура регазификации.

Все большее развитие получают технологии и схемные решения контура регазификации, в основе которых находятся термодинамические циклы Ренкина или Брайтона [4–5]. Базовый цикл системы регазификации криопродукта, в основе которого закрытый цикл Ренкина, показан на рис. 1.

В представленной схеме системы регазификации рабочим телом является жидкий воздух, циркулирующий в закрытом контуре. Криогенное рабочее тело (жидкий воздух) при помощи криогенного насоса 1 нагнетается в теплообменный аппарат 2, где жидкий воздух получает тепловую энергию от воздуха из окружающей среды. Рабочее тело переходит из жидкого агрегатного состояния в газообразное. Далее газообразный воздух поступает в турбину 3, где происходит его изоэнтальпийное расширение и полученная полезная работа идет на привод электрогенератора 4. Далее воздух конденсируется в теплообменном аппарате 5 за счет передачи теплоты жидкому азоту, который, в свою очередь, перекачивается насосом 6 из криогенного баллона 7 в теплообменный аппарат 5.

Работа криогенной силовой установки происходит по закрытому циклу Ренкина, показанному в тепловой диаграмме (рис. 2). Схема установки, которая использует низкопотенциальную теплоту рабочего тела, является довольно простой и экономичной. В качестве рабочего тела можно использовать как воздух, так и азот, сжиженный природный газ и т.д.

Закрытый цикл Ренкина состоит из последовательности данных процессов:

1–2 – процесс адиабатного сжатия рабочего тела в насосе;

2–5 – нагрев, парообразование и изобарный перегрев в теплообменном аппарате;

5–6 – адиабатное расширение пара в турбине;

6–1 – изобарный отвод теплоты и конденсации рабочего тела в теплообменнике.

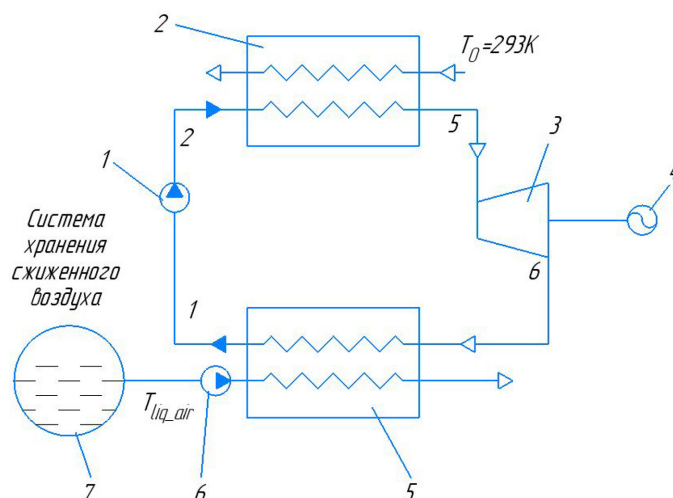


Рис. 1. Схема системы регазификации, работающей по закрытому циклу Ренкина: 1 – криогенный насос, 2 – теплообменный аппарат, 3 – турбина, 4 – электрогенератор, 5 – конденсатор, 6 – насос, 7 – система хранения сжиженного воздуха

Fig. 1. Schematic of a regasification system operating on a closed Rankine cycle: 1 – cryogenic pump, 2 – heat exchanger, 3 – turbine, 4 – electric generator, 5 – condenser, 6 – pump, 7 – liquefied air storage system

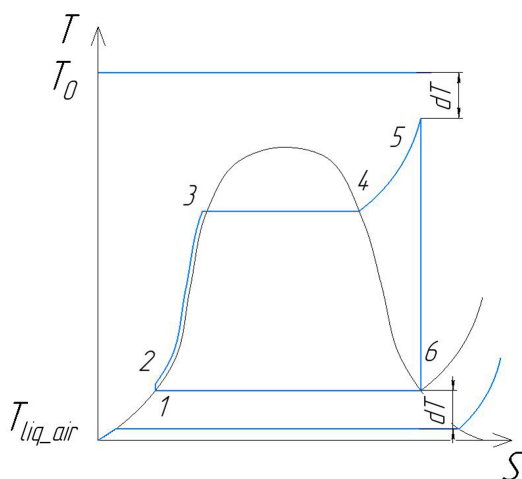


Рис. 2. Изображение закрытого цикла Ренкина на T-S диаграмме

Fig. 2. Temperature entropy diagram of ORC cycle

Термический КПД цикла Ренкина при заданных условиях ($T_{\text{нач.ж_возд}} = 77 \text{ K}$, $p_{\text{нач.ж_возд}} = 200 \text{ кПа}$, $T_0 = 273 \text{ K}$, $\eta_{\text{п}} = 0,92$, $\eta_{\text{т}} = 0,89$) составил 10 %.

Для повышения термического КПД цикла авторами проводятся лабораторные испытания и имитационное моделирование рабочих режимов криогенной системы, подбор рабочего тела с наиболее подходящими физико-химическими и термодинамическими свойствами [6–9].

Целью данной работы является оценка эффективности установки регазификации СПГ, работающей по двухкаскадному циклу Ренкина.

Для достижения указанной цели были определены следующие задачи: разработка расчетной модели и методики исследования, которые позволят получить данные по термодинамическим и энергетическим показателям всех представленных циклов. Это необходимо для того, чтобы сравнить циклы между собой и с другими известными техническими решениями. Также необходимо установить, как термодинамические параметры разных рабочих тел, конструктивные изменения установки (переход от одноступенчатого цикла к двухступенчатому) влияют на показатели ее эффективности (теоретическая мощность, тепловой КПД, эксергетических КПД).

Материалы и методы исследования

В качестве модели принята криогенная силовая установка, которая совершает работу по двойному закрытому циклу Ренкина или каскадному циклу Ренкина (рис. 3). Применение каскадной схемы закрытых циклов позволяет реализовывать большую часть процессов в двухфазной области рабочих тел, что, в свою очередь, позволяет уменьшить потери необратимости и повысить энергетическую эффективность установок [10].

На рис. 3 представлена схема системы регазификации, рабочим телом которой является жидкий воздух. Принцип работы данной силовой установки аналогичен принципу работы

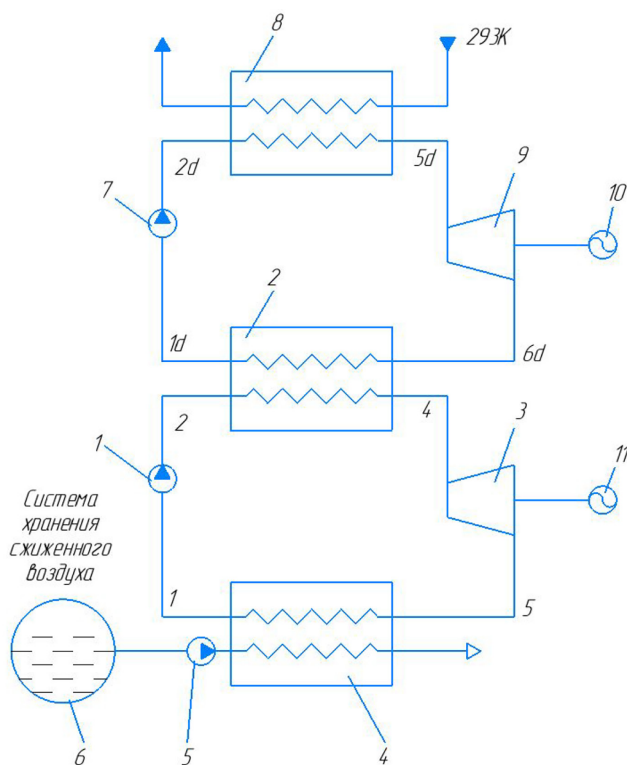


Рис. 3. Схема системы регазификации, работающей по двойному закрытому циклу Ренкина: 1, 7 – криогенный насос, 2, 4, 8 – теплообменный аппарат, 3, 9 – турбина, 5 – насос, 6 – система хранения сжиженного воздуха, 10, 11 – электрогенератор

Fig. 3. Schematic of a regasification system operating on a dual-cascade closed Rankine cycle: 1, 7 – cryogenic pump, 2, 4, 8 – heat exchanger, 3, 9 – turbine, 5 – pump, 6 – liquefied air storage system, 10, 11 – electric generator

установки, работающей по закрытому циклу Ренкина, представленной на рис. 1. Различия заключаются в том, что теплота к рабочему телу, которое охлаждается жидким воздухом, подводится не из окружающей среды, а от другого рабочего тела в теплообменнике 2, которое также осуществляет закрытый цикл Ренкина в верхнем каскаде, и уже к которому подводится теплота от окружающей среды в теплообменнике 8. В каждом контуре используются разные рабочие тела, поэтому профиль кривых насыщения может отличаться.

Регазифицировался жидкий воздух $T_{ж_возд} = 77$ К, расход $G = 1$ кг/с. Для расчетов принимались следующие данные: температура окружающей среды $T_0 = 293$ К, КПД насоса $\eta_{нас} = 0,92$; КПД турбины $\eta_t = 0,89$, перепад давления $dp = 1$; перепад температуры $dT = 1$. Двойной

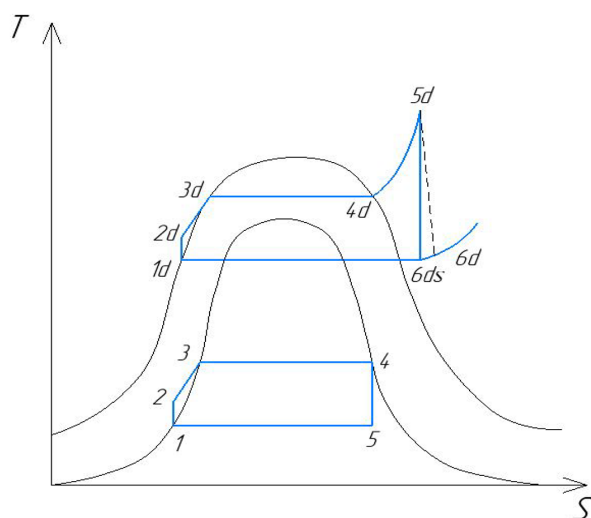


Рис. 4. Изображение двойного закрытого цикла Ренкина на T - S -диаграмме

Fig. 4. Temperature entropy diagram of the dual-cascade closed Rankine cycle

закрытый цикл Ренкина на тепловой диаграмме показан на рис. 4.

Закрытый цикл Ренкина состоит из последовательности данных процессов в нижнем каскаде:

- 1–2 – процесс адиабатного сжатия жидкого рабочего тела в насосе;
- 2–4 – изобарный подвод тепловой энергии в теплообменном аппарате;
- 4–5 – адиабатное расширение газа в турбине нижнего каскада;
- 5–1 – изобарный отвод теплоты и конденсация рабочего тела;

в верхнем каскаде:

- 1d – 2d – процесс адиабатного сжатия рабочего тела в насосе;
- 2d – 5d – изобарный подвод тепловой энергии в теплообменном аппарате;
- 5d – 6d – адиабатное расширение газа в турбине верхнего каскада;
- 6d – 1d – изобарный отвод теплоты и конденсация рабочего тела.

Целью термодинамических расчетов каждого каскада являлось определение параметров рабочего тела в узловых точках циклов, тепловой мощности турбины, температурных напоров

теплообменников и площади их теплопередающей поверхности. В качестве методики расчета были использованы рекомендации из работ [4–5, 11].

Расход рабочего тела верхнего каскада определяется из уравнения массового баланса испарителя-конденсатора:

$$G_2 = G_1 \cdot \frac{h_4 - h_2}{h_{5d} - h_{2d}}, \quad (1)$$

где G_1 – расход рабочего тела нижнего каскада, кг/с; G_2 – расход рабочего тела верхнего каскада, кг/с; h – удельная энтальпия в узловой точке цикла, кДж/кг.

Мощность турбины (W_t , кВт) и насоса ($W_{\text{нас}}$, кВт) найдены по следующим формулам:

$$W_{t1} = G_1 \cdot (h_4 - h_5), \quad (2)$$

$$W_{t2} = G_2 \cdot (h_{5d} - h_{6d}), \quad (3)$$

$$W_{\text{нас}1} = G_1 \cdot (h_2 - h_1), \quad (4)$$

$$W_{\text{нас}2} = G_2 \cdot (h_{2d} - h_{1d}). \quad (5)$$

Суммарная мощность цикла (N , кВт) определялась как разница между работой, вырабатываемой турбиной, и мощностью, потребляемой насосом:

$$N = W_{t1} + W_{t2} - W_{\text{нас}1} - W_{\text{нас}2}. \quad (6)$$

Термический КПД двухкаскадного цикла Ренкина определяется по формуле:

$$\eta_t = \frac{N}{G_2 \cdot (h_{5d} - h_{2d})}, \quad (7)$$

где N – мощность, полученная в турбинах, кВт; h_{2d} – удельная энтальпия рабочего тела перед теплообменником в т. 2d, кДж/кг; h_{5d} – удельная энтальпия перед турбиной в т. 5d, кДж/кг.

Количество теплоты, подводимое к рабочему телу для его нагрева или фазового перехода, определяется по разности энтальпии в узловых точках процесса:

$$Q_{\text{подв}} = G_{1(2)} \cdot (h_{\text{кон}} - h_{\text{нач}}), \quad (8)$$

где $G_{1(2)}$ – массовый расход рабочего тела в первом (или втором контуре), кг/с; $h_{\text{нач}}$ – значение удельной энтальпии в начале процесса, кДж/кг; $h_{\text{кон}}$ – значение удельной энтальпии в конце процесса, кДж/кг.

Среднелогарифмический температурный напор при изменении температуры теплоносителей в испарителе-конденсаторе и в конденсаторе определяется:

$$\Delta T_{\text{ср}} = \frac{\Delta T_{\text{вх}} - \Delta T_{\text{вых}}}{\ln \frac{\Delta T_{\text{вх}}}{\Delta T_{\text{вых}}}}, \quad (9)$$

где $\Delta T_{\text{вх}}$, $\Delta T_{\text{вых}}$ – температурные напоры на входе и на выходе теплообменного аппарата (на одном и на втором конце аппарата), К.

Среднетемпературный напор по участкам, где имеет место изменение агрегатного состояния теплоносителей:

$$\Delta T = T_{p.t.2} - T_{p.t.1}, \quad (10)$$

где $T_{p.t.}$ – значение температуры рабочего тела контура в процессе, К.

Для верхнего каскада среднетемпературный напор по участкам найден по следующим формулам:

$$\Delta T_{2d-3d} = \frac{(T_0 - T_{3d}) - (T_0 - T_{2d})}{\ln \left(\frac{T_0 - T_{3d}}{T_0 - T_{2d}} \right)}, \quad (11)$$

$$\Delta T_{3d-4d} = (T_0 - T_{4d}), \quad (12)$$

$$\Delta T_{4d-5d} = \frac{(T_0 - T_{4d}) - (T_0 - T_{5d})}{\ln \left(\frac{T_0 - T_{4d}}{T_0 - T_{5d}} \right)}, \quad (13)$$

где $T_0 = 293$ К – температура окружающей среды.

Коэффициент теплопередачи для рабочих тел в жидком состоянии находится в диапазоне значений 500...4500 кВт/(м²·К), для пара – в диапазоне 50...270 кВт/(м²·К) [12]. Тогда на участке нагрева рабочего тела нижнего контура (2–3): $k_{2-3} = 1000$ кВт/(м²·К); на участке кипения (3–4): $k_{3-4} = 1000$ кВт/(м²·К); на участке нагрева жидкого воздуха в верхнем контуре (2d – 3d): $k_{2d-3d} = 1000$ кВт/(м²·К); на участке кипения (3d – 4d): $k_{3d-4d} = 1000$ кВт/(м²·К); на участке перегрева (4d – 5d): $k_{4d-5d} = 200$ кВт/(м²·К).

Тогда необходимая площадь наружной поверхности теплообмена на участках (2–3), (3–4), (2–1), (2–2) нижнего каскада определяется по формулам (14) и (15) соответственно:

$$F_1 = \frac{Q_{2-3}}{k_{2-3} \cdot \Delta T_{2-3}} + \frac{Q_{3-4}}{k_{3-4} \cdot \Delta T_{3-4}}; \quad (14)$$

$$F_2 = \frac{Q_{2-1}}{k_{2-1} \cdot \Delta T_{2-1}} + \frac{Q_{2-2}}{k_{2-2} \cdot \Delta T_{2-2}}. \quad (15)$$

Необходимая площадь наружной поверхности теплообменника на участках (2d–3d), (3d–4d), (4d–5d) верхнего каскада определяется по формуле (16):

$$F_3 = \frac{Q_{2d-3d}}{k_{2d-3d} \cdot \Delta T_{2d-3d}} + \frac{Q_{3d-4d}}{k_{3d-4d} \cdot \Delta T_{3d-4d}} + \frac{Q_{4d-5d}}{k_{4d-5d} \cdot \Delta T_{4d-5d}}. \quad (16)$$

Зависимость стоимости оборудования от расчетных значений определена по модели, предложенной в работе [13].

Эксерго-экономический анализ объединяет анализ эксергии с экономической оценкой системы путем определения стоимости потоков эксергии. Целью этого анализа является снижение себестоимости продукции системы путем определения затрат на разрушение и потери эксергии.

Стоимость «горячего» и «холодного» теплообменных аппаратов вычисляется по формулам:

$$ZTO_1 = (2143 + F_1^{0.514}) \cdot 1000, \quad (17)$$

$$ZTO_2 = (2143 + F_2^{0,514}) \cdot 1000, \quad (18)$$

$$ZTO_3 = (2143 + F_3^{0,514}) \cdot 1000, \quad (19)$$

где Z – капитальные вложения компонента системы, дол. F – площадь теплообменного аппарата, м².

Стоимости насоса и турбины будут определены по формулам:

$$ZN_1 = 1120 \cdot W_{\text{нас1}}^{0,8}, \quad (20)$$

$$ZN_2 = 1120 \cdot W_{\text{нас2}}^{0,8}, \quad (21)$$

$$ZT_1 = 6000 \cdot W_{\text{т1}}^{0,7}, \quad (22)$$

$$ZT_2 = 6000 \cdot W_{\text{т2}}^{0,7}, \quad (23)$$

где W_t – мощность, полученная в турбине, кВт; $W_{\text{нас}}$ – мощность, затраченная на привод насоса, кВт; Z – капитальные вложения компонента системы, дол.

Общая стоимость криогенной установки:

$$Z = ZTO_1 + ZTO_2 + ZTO_3 + ZN_1 + ZN_2 + ZT_1 + ZT_2. \quad (24)$$

Результаты и обсуждения

Оптимизация контура регазификации, работающего по двухкаскадному циклу Ренкина, осуществлялась на основе алгоритма, реализованного на языке программирования Python.

Одним из важнейших направлений исследований является получение так называемых Парето-оптимальных вариантов.

Методика получения фронта Парето детально описана в работах [14, 15].

Алгоритм получения Парето-оптимальных решений состоит из нескольких этапов:

- 1) определение характеризующих параметров (в нашем случае это мощность и стоимость установки);
- 2) определение диапазона рассматриваемых исходных данных (степени повышения давления в насосах, температурные напоры в теплообменниках, рабочие тела);
- 3) определение выборки расчетных значений в рамках заданных исходных данных;
- 4) определение Парето-оптимальной функции (в данном случае для каждой характерной точки не должно существовать решений, которые будут мощнее и дешевле);
- 5) проверка значений расчетной выборки на соответствие Парето-оптимальной функции.

Распределение совокупности полученных значений мощности и стоимости в результате расчета в программно-аналитическом комплексе и распределение данных значений по эффективности Парето для двойного закрытого цикла Ренкина показано на рис. 5.

Анализ популяции фронта Парето. При анализе популяции фронта Парето особый интерес представляет тип рабочего тела, которое используется в Парето-оптимальных конфигурациях контура. Фронт Парето с указанием рабочих тел нижнего и верхнего каскадов представлен на рис. 6–7.

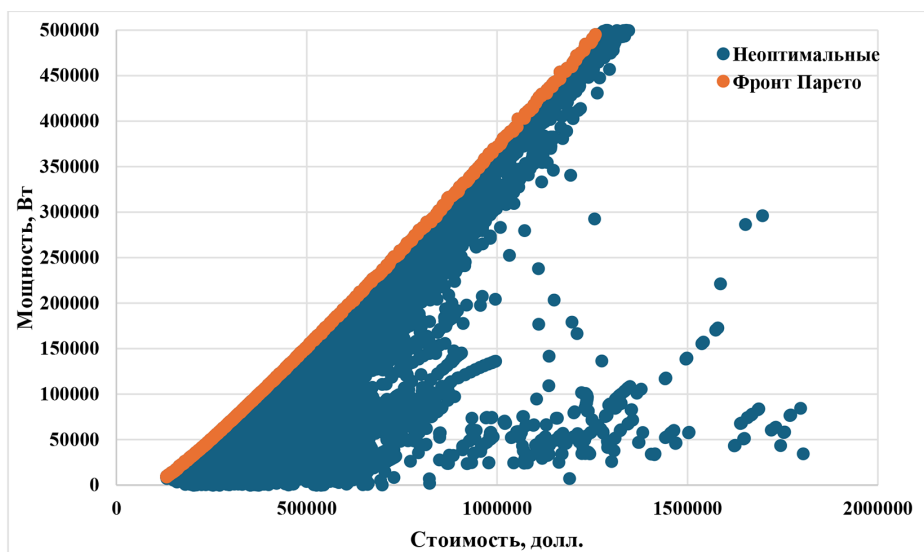


Рис. 5. Распределение совокупности полученных значений мощности и стоимости в результате расчета в программно-аналитическом комплексе и распределение данных значений по эффективности Парето для двойного цикла Ренкина

Fig. 5. Distribution of the set of obtained power and cost values as a result of calculation in the software and analytical complex and distribution of these values according to Pareto efficiency for the dual-cascade Rankine cycle

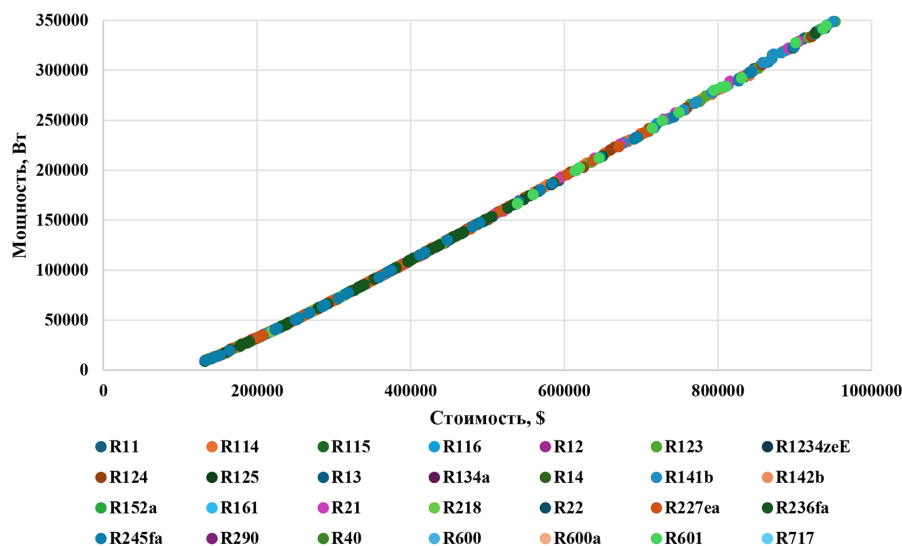


Рис. 6. Фронт Парето для рабочих тел нижнего каскада

Fig. 6. Pareto front for working fluids of the lower cascade

Из анализа графической зависимости можно сделать вывод, что в более мощной и дорогой области фронта представлены установки, работающие на аммиаке (R717), пропане (R290), дифторхлорметане (R22), пропилене (R1270) и 1,1,1,2-тетрафторэтан (R134a) в качестве рабочих тел нижнего каскада. В аналогичной области для рабочих тел верхнего каскада находятся

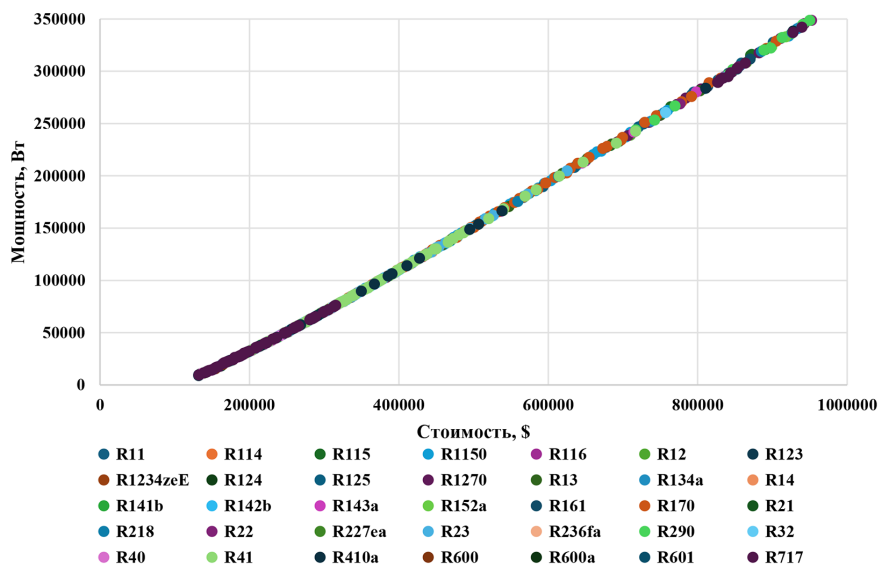


Рис. 7. Фронт Парето с указанием рабочих тел верхнего каскада

Fig. 7. Pareto front for working fluids of the upper cascade

гидрохлорфторуглерод (R123), 1-фтор-1,1-дихлорэтан (R141b), н-пентан (R601), трихлорфторметан (R11).

Для большей наглядности на рис. 8–9 приведено процентное соотношение Парето-оптимальных конфигураций по рабочим телам нижнего и верхнего каскадов из общего количества установок, работающих по двойному закрытому циклу Ренкина.

Из диаграммы видно, что в отличие от других установок, работающих на основе цикла Ренкина, отсутствуют явно выраженные лидеры в количестве представленных установок. Как было указано выше, величина срока окупаемости будет пропорциональна отношению стоимости установки к ее мощности. Аналогичным образом можно оценить рентабельность установки, которая, в свою очередь, будет пропорциональна отношению мощности к стоимости. В таком случае установка, у которой это отношение будет максимальным и будет наиболее рентабельной. Анализ рентабельности установок по данному отношению представлен на рис. 10–11.

Анализ рентабельности показывает, что наиболее эффективными установками являются установки, работающие на трихлорфторметане (R11), пентафторэтане (R125), 1,1,1,2-тетрафторэтане (R134a), н-бутане (R600) и его изомере – изобутане (R600a) в качестве рабочего тела нижнего каскада, и этане (R161), 1-хлор-1,1-дифторэтане (R142b), пентафторэтане (R125), пропане (R290), трифторхлорметане (R13) в качестве рабочего тела верхнего каскада. При этом конфигурацией с наибольшей рентабельностью является конфигурация, использующая в качестве рабочего тела нижнего каскада трихлорфторметан (R11) и в качестве рабочего тела верхнего каскада – этан (R161).

Для определения эксергетических потерь в элементах установки и эксергетического КПД каждого элемента был выполнен эксергетический анализ, который широко применяется для оценки эффективности теплоэнергетических установок [16–17].

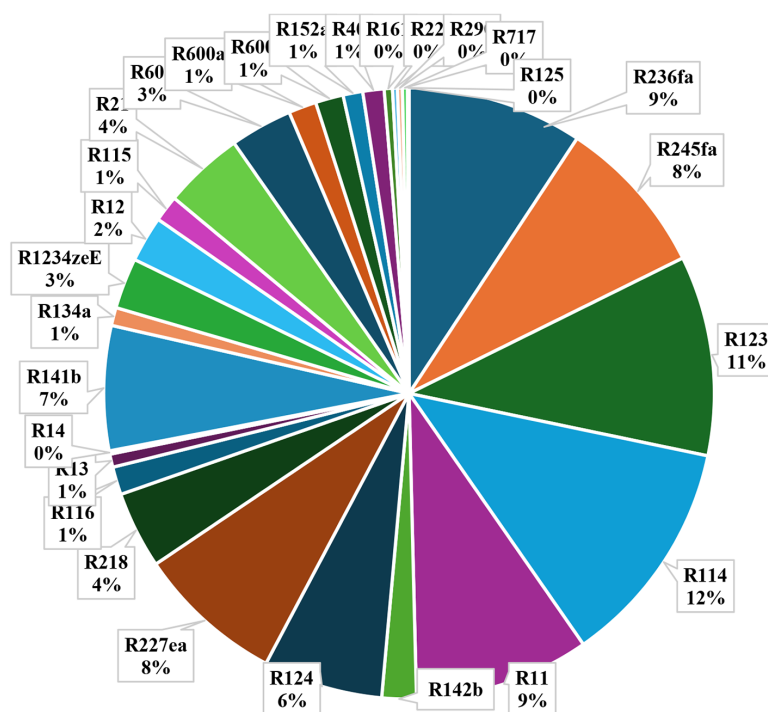


Рис. 8. Соотношение Парето-оптимальных конфигураций по рабочим телам нижнего каскада

Fig. 8. Ratio of Pareto-optimal configurations for working fluids of the lower cascade

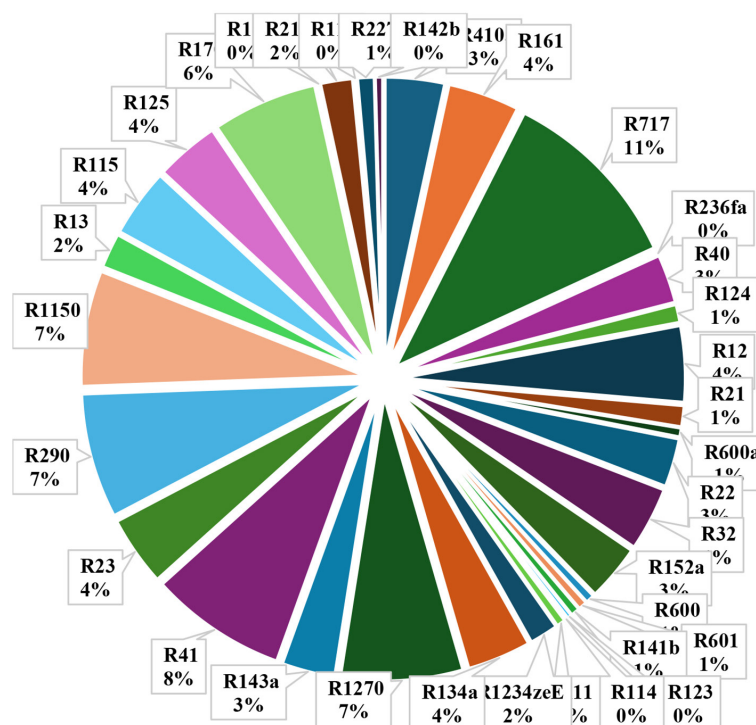


Рис. 9. Соотношение Парето-оптимальных конфигураций по рабочим телам верхнего каскада

Fig. 9. Ratio of Pareto-optimal configurations for working fluids of the upper cascade

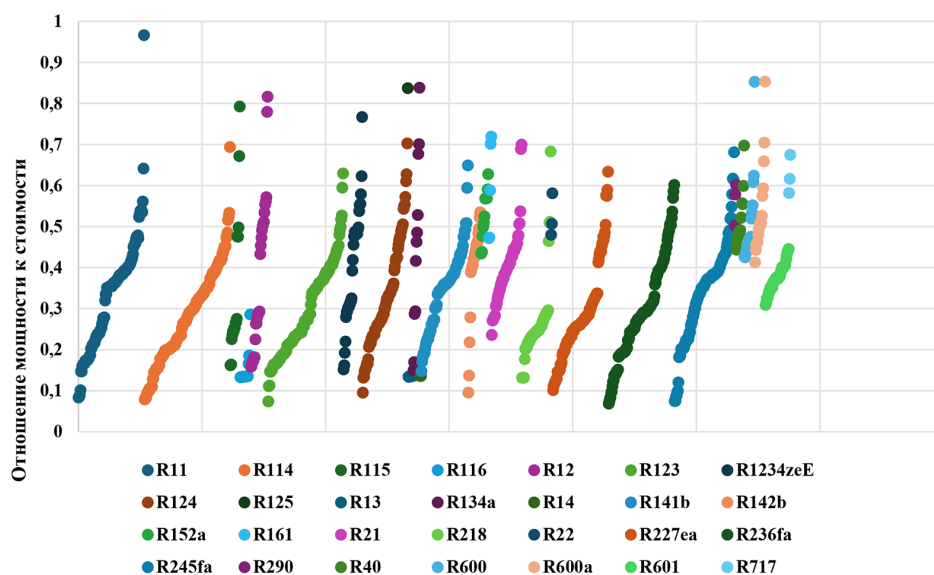


Рис. 10. Рентабельность установок в зависимости от типа рабочего тела нижнего каскада

Fig. 10. Profitability of installations depending on the type of lower cascade working fluid

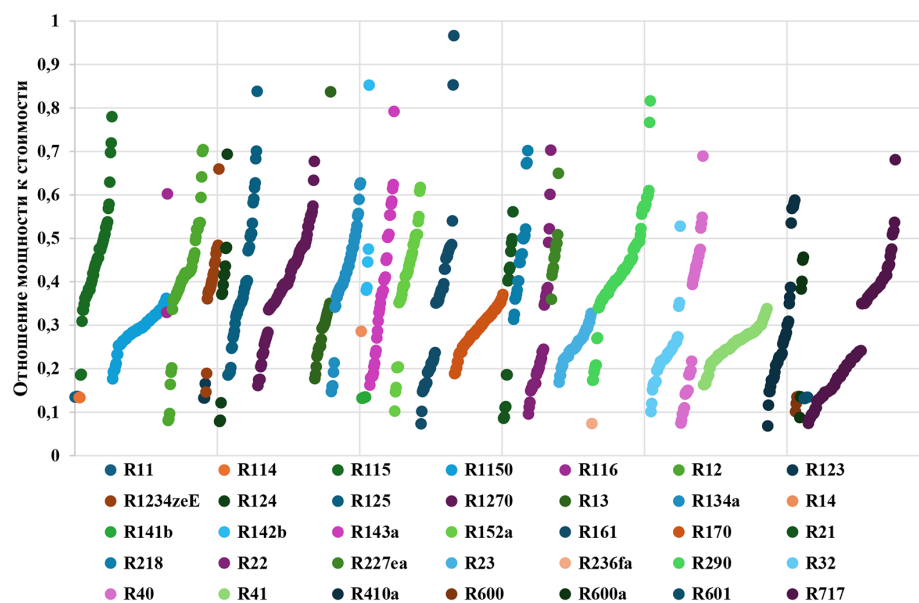


Рис. 11. Рентабельность установок в зависимости от типа рабочего тела верхнего каскада

Fig. 11. Profitability of installations depending on the type of upper cascade working fluid

Эксергия рабочего тела в i точке определяется по формуле:

$$ex_i = h_i - h_o - T_o(s_i - s_o), \quad (25)$$

где h_i и s_i – энтальпия и энтропия в точке i ; h_o , s_o и T_o – энтальпия, энтропия и температура, соответствующие окружающей среде.

Эксергетический КПД регазификатора определяется следующим образом:

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{N}{(ex_{\text{в1}} - ex_{\text{в2}}) \cdot G}, \quad (26)$$

где $ex_{\text{в1}}$ и $ex_{\text{в2}}$ – значение удельной эксергии воздуха на входе и выходе в теплообменник 4 (по рис. 3), кДж/кг; G – массовый расход воздуха, кг/с.

В табл. 1 представлены значения параметров в характерных точках цикла для оптимальной конфигурации регазификатора воздуха, работающего по двойному циклу Ренкина, на ме-

Таблица 1. Параметры рабочих тел в характерных точках двойного закрытого цикла Ренкина

Table 1. Parameters of working fluids at characteristic points of the dual-cascade closed Rankine cycle

Характерная i точка цикла	p_i , кПа	T_i , К	h_i , кДж/кг	s_i , кДж/(кг·К)	ex_i , кДж/кг	G , кг/с
1	110	112,7	3,5	0,03	1040,1	0,45
2	1110	113	6,1	0,03	1042,2	0,45
3	1110	151,4	148,6	1,1	867,9	0,45
4	1110	151,4	555,8	3,8	487,3	0,45
5	110	112,7	442,5	3,9	337,5	0,45
1d	100	169,1	-0,5	-0,003	401,3	0,46
2d	500	169,3	0,2	-0,002	402	0,46
3d	500	202	81,56	0,43	670,2	0,46
4d	500	202	509,67	2,552	476,58	0,46
5d	500	292	643,4	3,1	449,75	0,46
6d	100	214,6	541,1	3,2	318,05	0,46
в1 вход	100	77	-122,8	2,8	743,1	1
в2 выход	100	77	76,9	5,4	-795,4	1

тане (R50) в качестве рабочего тела нижнего каскада и этилене (R1150) в качестве рабочего тела верхнего каскада.

Зависимости для определения эксергетического КПД узлов регазификатора воздуха для насоса

$$\eta_{\text{exнас}} = \frac{ex_{i+1}}{ex_i + l_{\text{нас}}};$$

для турбины

$$\eta_{\text{ext}} = \frac{ex_{i+1} + l_{\text{т}}}{ex_i};$$

для теплообменного аппарата

$$\eta_{\text{exто}} = \frac{ex_{T+1} + ex_{X+1}}{ex_T + ex_X};$$

и потерь эксергии в данных узлах:

$$\Delta ex = \sum ex_i - \sum ex_{X+1},$$

где индекс $i+1$ соответствует точке на выходе из узла, а i – на входе в узел; индекс «г» и «х» соответствует горячему и холодному теплоносителю в теплообменном аппарате. Полученные значения эксергетических КПД представлены на рис. 12а и потери эксергии в узлах регазификатора воздуха – на рис. 12б.

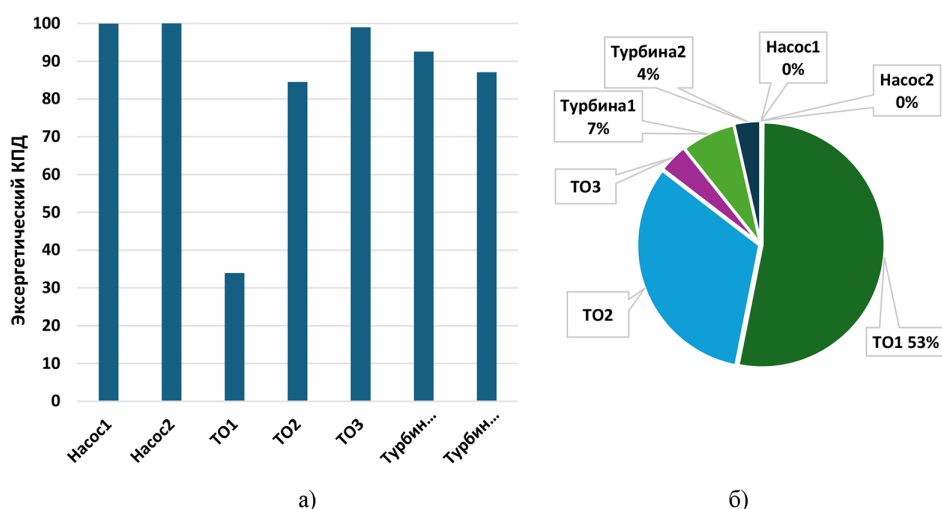


Рис. 12. Значения эксергетических КПД (а) и потерь эксергии в узлах регазификатора воздуха (б)

Fig. 12. Values of exergy efficiency (a) and exergy losses in the air regasifier units (b)

Низкий эксергетический КПД теплообменника объясняется тем, что высокий температурный напор оказывает негативное влияние на эффективность. С другой стороны, увеличение температурного напора снижает величину площади поверхности теплообмена, а соответственно, уменьшает его стоимость, что увеличивает рентабельность регазификатора.

Заключение

В проведенной работе изложены результаты комплексного исследования, посвященного оптимизации контура регазификации криопродукта на базе двухкаскадного замкнутого цикла Ренкина для применения в криогенных системах накопления энергии. Актуальность работы обусловлена растущей ролью КСНЭ в контексте интеграции возобновляемых источников энергии и необходимостью повышения эффективности и экономичности низкотемпературных энергетических установок.

Ключевые результаты заключаются в следующем:

1. Установлено, что наиболее перспективными рабочими телами для нижнего каскада цикла являются трихлорфторметан (R11), пентафторэтан (R125), 1,1,1,2-тетрафторэтан (R134a), н-бутан (R600) и его изомер – изобутан (R600a), а для верхнего каскада – этан (R161), 1-хлор-1,1-дифторэтан (R142b), пентафторэтан (R125), пропан (R290), трифторхлорметан (R13), обеспечивающие наилучшее соотношение мощности и капитальных затрат.

2. Выявлена и количественно оценена оптимальная конфигурация системы: методом Парето показана целесообразность использования метана в нижнем каскаде и этилена в верхнем каскаде. Данная конфигурация характеризуется максимальной рентабельностью.

3. Определен эксергетический КПД установки для регазификации криопродукта на базе двухкаскадного замкнутого цикла Ренкина. Наименьшие потери эксергии в насосе и турбине, а наибольшие потери эксергии в теплообменном аппарате – регазификаторе, что связано с высоким температурным напором и, как следствие, потерями теплоты в окружающую среду.

4. Показано, что переход от базового одноступенчатого цикла Ренкина к двухкаскадной схеме позволяет повысить эффективность утилизации потенциала криопродукта за счет снижения необратимых потерь в процессах.

Проведенное исследование вносит значительный вклад в развитие методов проектирования энергоэффективных и экономически целесообразных криогенных систем. Полученные результаты и разработанная методика могут быть использованы для оптимизации широкого класса низкотемпературных энергетических установок, включая системы регазификации сжиженного природного газа (СПГ) и другие технологии, использующие криогенные продукты.

Дальнейшие исследования направлены на проектирование энергоэффективных криогенных систем накопления энергии.

Список литературы / References

- [1] Hamdy S., Morosuk T., Tsatsaronis G. Cryogenics-based energy storage: Evaluation of cold exergy recovery cycles. *Energy*, 2017, 138, 1069–1080.
- [2] Sciacovelli A. Vecchi A., Ding Y. Liquid air energy storage (LAES) with packed bed cold thermal storage – From component to system level performance through dynamic modelling. *Applied Energy*, 2017, 190, 84–98.
- [3] She X., Wang H., Zhang T., Li Y., Zhao X., Ding Y., Wang C. Liquid air energy storage – A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, 208, 114986.
- [4] Довгялло А. И., Угланов Д. А., Воротынцева К. Е. и др. Эффективность цикла Ренкина при условии получения максимальной мощности применительно к низкотемпературной энергетической установке, использующей криопродукт как рабочее тело. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2020, 6, 3–7 [Dovgyallo A. I., Uglanov D. A., Vorotyntseva K. E., et al. The efficiency of the Rankine cycle under the condition of obtaining maximum power in relation to a low-temperature power plant using a cryoprodukt as a working fluid. *J. Chem. and Oil and Gas Engin.*, 2020, 6, 3–7 (in Russian)].
- [5] Ohji A.; Haraguchi M. (2022–01–01), Tanuma Tadashi (ed.), “2 – Steam turbine cycles and cycle design optimization: the Rankine cycle, thermal power cycles, and integrated gasification-combined cycle power plants”, *Advances in Steam Turbines for Modern Power Plants (Second Edition)*,

Woodhead Publishing Series in Energy, Woodhead Publishing, pp. 11–40, doi:10.1016/b978-0-12-824359-6.00020-2

[6] Тремкина О.В., Аденап Х., Шихалев В.И. и др. Расчетное исследование гибридной криогенной силовой установки для БПЛА с подводом теплоты от двигателя внутреннего сгорания. *Вестник Московского авиационного института*, 2023, 30 (3), 155–162 [Tremkina O. V., Adenan H., Shikhalev V. I., et al. Computational Study of a Hybrid Cryogenic Power Plant for UAVs with Heat Input from an Internal Combustion Engine. *Bulletin of the Moscow Aviation Ins.*, 2023, 30 (3), 155–162 (in Russian)]

[7] Угланов Д. А., Тремкина О. В., Аденап Х. Разработка и создание беспилотных летательных аппаратов с криогенной силовой установкой. *Тепловые процессы в технике*, 2022, 14 (6), 255–260 [Uglanov D. A., Tremkina O. V., Adenan H. Development and Creation of Unmanned Aerial Vehicles with a Cryogenic Propulsion System. *J. Thermal Processes in Engineering*, 2022, 14 (6), 255–260 (in Russian)]

[8] Угланов Д. А., Тремкина О. В., Лю Юйвэй. Предпроектная оценка и выбор оптимальных параметров низкотемпературных энергетических установок для криогенных систем аккумуляции энергии. *Вестник Международной Академии холода*, 2024, 2, 13–21 [Uglanov D. A., Tremkina O. V., Liu Yuwei. Pre-project assessment and selection of optimal parameters for low-temperature power plants for cryogenic energy storage systems. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*, 2024, 2, 13–21 (in Russian)]

[9] Карнаух В. В., Крылова А. Д., Лопатин А. Л. и др. Расчет и подбор оптимальной схемы гибридной криогенной энергетической установки, работающей на жидком водороде. *Вестник Международной академии холода*, 2020, 2 (75), 9–18 [Karnaukh V. V., Krylova A. D., Lopatin A. L., et al. Calculation and selection of the optimal scheme for a hybrid cryogenic power plant operating on liquid hydrogen. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*, 2020, 2 (75), 9–18 (in Russian)]

[10] Щинников П. А., Боруш О. В., Лузина А. А. Влияние термодинамических параметров и архитектуры двухступенчатого цикла Ренкина на его эффективность. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*, 2025, 18(3). С. 325–342. EDN: IAWZVU [Shchinnikov P. A., Borush O. V., Luzina A. A. Influence of the Thermodynamic Parameters and Architecture of the Two-Stage Rankin Cycle on Its Efficiency. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2025, 18(3), 325–342. EDN: IAWZVU (in Russian)]

[11] Шиманова А. Б., Благин Е. В., Угланов Д. А., Шиманов А. А., Гаев Е. С. Оптимизация контура регазификации криогенной системы накопления энергии, работающего по циклу Брайтона с промежуточным перегревом пара. *Вестник Международной академии холода*, 2025, 3, 22–29. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-3-22-29. [Shimanova A. B., Blagin E. V., Uglanov D. A., Shimanov A. A., Gaev E. S. Optimization of the regasification circuit of a cryogenic energy storage system operating on the Brighton cycle with intermediate steam overheating. *Journal of International Academy of Refrigeration*, 2025, 3., 22–29. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-3-22-29 (in Russian)]

[12] Incropera F. P., DeWitt D. P., Bergman T. L. & Lavine A. S. (2013). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (7th ed.). John Wiley & Sons.

[13] Özen D., Koçak B. Advanced exergy and exergo-economic analyses of a novel combined power system using the cold energy of liquefied natural gas. [Electronic resource] – Access: https://www.researchgate.net/publication/359069155_Advanced_exergy_and_exergo-economic_analyses_of_a_novel_combined_power_system_using_the_cold_energy_of_liquefied_natural_gas.

[14] Omid Sabbagh, Mohammad Ali Fanaei, Alireza Arjomand, Mohammad Hossein Ahmadi, Multi-objective optimization assessment of a new integrated scheme for co-production of natural gas liquids and liquefied natural gas, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. [Electronic resource] – Access: https://www.researchgate.net/publication/353676977_Multi-objective_optimization_assessment_of_a_new_integrated_scheme_for_co-production_of_natural_gas_liquids_and_liquefied_natural_gas.

[15] Roy A., So G., Ma, Yi-An. Optimization on Pareto sets: On a theory of multi-objective optimization. 2023, DOI 10.48550/arXiv.2308.02145. [Electronic resource] – Access: https://www.researchgate.net/publication/372950779_Optimization_on_Pareto_sets_On_a_theory_of_multi-objective_optimization.

[16] Hamdy S., Morosuk T., Tsatsaronis G. Exergoeconomic optimization of an adiabatic cryogenics-based energy storage system. *Energy*, 2019, 183, 812–824.

[17] Тремкина О. В., Угланов Д. А., Карнаух В. В. Эксергетический метод оценки эффективности низкотемпературных энергетических установок, использующих низкопотенциальное тепло криопродукта. *Вестник Международной академии холода*, 2024, 3, 18–24. [Tremkina O. V., Uglanov D. A., Karnaukh V. V. Exergetic method for assessing the efficiency of low-temperature power plants using low-potential heat of cryoproduct. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*, 2024, 3, 18–24 (in Russian)]

Theoretical and Applied Heat Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: LXKCLKF

УДК 662.61

**Analysis of the Thermal And Mass Balances of a Furnace
for Thermal Neutralization of Liquid Waste**

Bogdan E. Timchenko*

*Omsk State Transport University
Omsk, Russian Federation*

Received 22.02.2026, received in revised form 31.03.2026, accepted 19.05.2026

Abstract. The article presents an analysis of an incinerator for thermal neutralization of liquid waste, including the calculation of the stoichiometric equation for the combustion process of a general type fuel and the development of the furnace's energy balance that takes into account the significant impact of additional water injection into the working volume and the temperature dependent heat capacity of the components. The study enables determination of the most efficient operational parameters of the incinerator, which ensure highly effective combustion of liquid waste, compliance with current environmental emission standards, and stable operation of the unit with various types of fuel. The obtained results have practical significance and can be used in the design of new thermal waste treatment plants and the modernization of existing incinerators.

Keywords: incinerator, liquid waste, thermal balance, thermal neutralization, combustion.

Citation: Timchenko B. E. Analysis of the Thermal And Mass Balances of a Furnace for Thermal Neutralization of Liquid Waste. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(5), 605–611. EDN: LXKCLKF



Анализ теплового и массового балансов печи для термического обезвреживания жидких отходов

Б. Е. Тимченко

*Омский государственный университет путей сообщения
Российская Федерация, Омск*

Аннотация. В статье представлен анализ инсинератора для термического обезвреживания жидких отходов, включающий расчет стехиометрического уравнения процесса горения топлива общего вида и составление энергетического баланса печи с учетом значимого влияния дополнительного впрыска воды в рабочий объем и зависимости теплоемкости компонентов от температуры. Исследование позволяет определить наиболее эффективные эксплуатационные параметры инсинератора, обеспечивающие высокоэффективное сжигание жидких отходов, соблюдение действующих экологических нормативов по выбросам и устойчивую работу установки при разных видах топлива. Полученные результаты имеют прикладное значение и могут быть использованы при проектировании новых установок термической утилизации и модернизации существующих инсинераторов.

Ключевые слова: инсинератор, жидкие отходы, тепловой баланс, термическое обезвреживание, сжигание.

Цитирование: Тимченко Б. Е. Анализ теплового и массового балансов печи для термического обезвреживания жидких отходов / Б. Е. Тимченко // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(5). С. 605–611. EDN: LXXLKF

Актуальные вопросы термического обезвреживания жидких отходов

В условиях интенсификации промышленного производства и роста объемов жидких отходов промышленного и коммунального происхождения проблема их эффективного и экологически безопасного обезвреживания приобретает особую актуальность. Значительная часть таких отходов характеризуется высоким содержанием токсичных и трудноокисляемых компонентов, что существенно ограничивает возможности их утилизации методами физико-химической очистки и захоронения [6].

Эффективность термического обезвреживания жидких токсичных отходов подтверждена результатами промышленных и экспериментальных исследований, в которых показано, что высокотемпературная обработка обеспечивает глубокое разрушение опасных органических соединений и снижение экологических рисков [1].

Инсинераторы данного типа представляют собой сложные энергетические системы, в которых одновременно протекают процессы испарения значительных объемов жидкости, химического превращения топлива и теплообмена. Эффективность их функционирования в значительной степени определяется режимами подачи топлива, воздуха и жидких отходов, а также термодинамическими параметрами процесса горения.

Существующие методы расчета инсинераторов, как правило, основаны на упрощенных термодинамических моделях, не в полной мере учитывающих влияние впрыска воды, фазовые превращения и температурную зависимость теплофизических свойств продуктов сгорания. Это приводит к расхождениям между расчетными и фактическими температурными режимами и затрудняет оптимизацию эксплуатационных параметров установок.

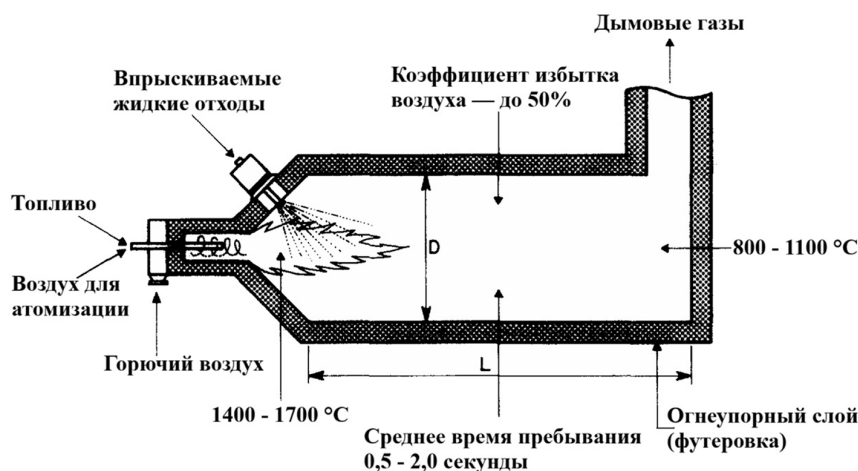


Рис. 1. Типичная установка для сжигания жидких отходов

Fig. 1. Typical liquid waste incineration plant

В связи с этим актуальной является разработка расчетных методик, основанных на строгом учете теплового и массового балансов процесса горения с привлечением аналитических зависимостей теплофизических характеристик компонентов дымовых газов. Типичная конфигурация инсинератора этого типа показана на рис. 1.

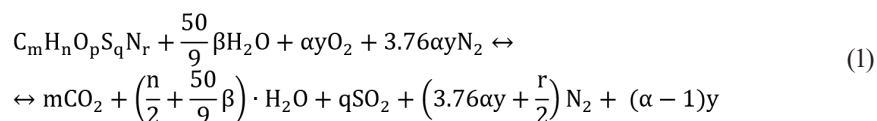
Описание расчетной модели процесса горения в инсинераторе

В рамках настоящей работы процесс горения рассматривается с использованием топлива обобщенного элементного состава $C_mH_nO_pS_qN_r$ [2]. Жидкие отходы в расчетной модели представлены в виде чистой воды (100 % H_2O), что позволяет сосредоточить анализ на энергетическом влиянии влаги на процесс горения без усложнения модели дополнительными химическими реакциями.

Для упрощения расчетов анализ проводится при расчетной базе 100 г топлива, что обеспечивает удобство определения коэффициентов m , n , p , q и r на основе массового элементного состава. Такой подход широко применяется в инженерных расчетах и позволяет оперативно адаптировать модель под конкретные виды топлива и отходов [3].

Стехиометрический анализ совместного сжигания топлива и жидких отходов

Стехиометрическое уравнение процесса горения при нормированном избытке воздуха (α) имеет следующий вид:



где $\frac{50}{9}$ – переход от массовой доли к киломолям при базе 100 г топлива; β – безразмерный коэффициент, характеризующий отношение массового расхода отходов (или дополнительного

компонента) к массовому расходу основного топлива, используемый для учета совместного сжигания в стехиометрическом уравнении горения; α – нормированный коэффициент избытка воздуха; y – стехиометрическая потребность топлива в кислороде, $y = m + q + n/4 - p/2$ [2]; $\frac{n}{2}$ – вода, образованная при сгорании водорода топлива [3]; 3,76 – соотношение азота к кислороду в воздухе.

Полученное стехиометрическое уравнение горения с учетом нормированного коэффициента избытка воздуха α и коэффициента β , характеризующего соотношение расходов жидких отходов и топлива, позволяет учитывать влияние совместного сжигания на состав и количество продуктов реакции.

Использование данной модели обеспечивает комплексный анализ процесса термического обезвреживания с учетом дополнительного впрыска воды и связанных с ним энергетических эффектов.

Энергетический баланс и температурный режим инсинератора

Энергетический баланс горения, учитывающий нагрев продуктов с конечной температурой и фазовыми превращениями воды, с существенным участием водяного пара и с учетом реального термического КПД процесса:

$$\eta \Delta H = \int_{T_n}^{T_k} \left[\sum_i n_i c_{pi}(T) \right] dT + \Delta H_1 [2].$$

В формуле (2) полезная часть теплового эффекта реакции, определяемая произведением энтальпии сгорания топлива ΔH на термический коэффициент полезного действия процесса η , расходуется на нагрев продуктов сгорания от начальной температуры T_n до конечной температуры T_k и на осуществление дополнительных энергетических затрат, связанных с фазовыми

превращениями, прежде всего с испарением воды. Интегральный член $\int_{T_n}^{T_k} \left[\sum_i n_i c_{pi}(T) \right]$

описывает суммарное изменение энтальпии всех компонентов дымовых газов, где n_i – количество молей i -го компонента продуктов сгорания, а $c_{pi}(T)$ – его удельная теплоемкость при постоянном давлении, зависящая от температуры, что позволяет корректно учитывать нагрев газовой смеси в широком температурном диапазоне. Слагаемое ΔH_1 вводится для учета энтальпии фазового перехода воды при начальной температуре процесса и отражает затраты энергии на испарение жидкой воды или, в более общем случае, на переход воды между различными агрегатными состояниями.

При использовании инсинератора с циклонно-вихревыми предтопками термический КПД может достигать 95 % [4].

Для аналитического расчета энергетического баланса процесса сжигания водосодержащих отходов необходимо учитывать температурную зависимость удельных теплоемкостей компонентов дымовых газов. Экспериментальные данные показывают, что в диапазоне температур, характерных для процессов горения, теплоемкости газообразных продуктов существенно зависят от температуры, вследствие чего использование постоянных значений c_p приводит к значительным погрешностям при определении температуры продуктов сгорания. В связи

с этим в настоящей работе теплоемкости основных компонентов дымовых газов аппроксимированы аналитическими функциями температуры, допускающими замкнутое аналитическое интегрирование.

Для каждого i -го компонента продуктов сгорания теплоемкость при постоянном давлении представлена в виде:

$$c_{pi}(T) = a_i + b_i T + c_i T^2 + d_i T^{-2}, \quad (3)$$

где коэффициенты a_i , b_i , c_i , d_i определены по табличным термодинамическим данным [5] методом наименьших квадратов в соответствующем температурном интервале. Выбор данной формы аппроксимации обусловлен тем, что она широко применяется в термодинамике и теории горения, адекватно описывает экспериментальные данные и позволяет аналитически вычислять изменение энтальпии при нагреве газов.

Используя значения n_i , определенные уравнением (1), и вводя функции зависимости удельных теплоемкостей c_{pi} компонентов дымовых газов от температуры T в уравнении (2), после интегрирования получаем следующее выражение:

$$\begin{aligned} 100\eta\Delta H = & \left[10.34m + 8.22 \left(\frac{n}{2} + \frac{50\beta}{9} \right) + 7.70q + 6.50 \left(3.76\alpha y + \frac{r}{2} \right) + 8.27(\alpha - 1)y \right] \times \\ & \times (T_k - T_n) + \left[1.37 \times 10^{-3}m + 7.50 \times 10^{-5} \left(\frac{n}{2} + \frac{50\beta}{9} \right) + 2.65 \times 10^{-5}q + 5.00 \times \right. \\ & \times 10^{-4} \left(3.76\alpha y + \frac{r}{2} \right) + 1.29 \times 10^{-4}(\alpha - 1)y \left. \right] (T_k^2 - T_n^2) + \\ & + \left[4.47 \times 10^{-7} \left(\frac{n}{2} + \frac{50\beta}{9} \right) - 2.77 \times 10^{-7}q \right] (T_k^3 - T_n^3) + \\ & + [(195500m + 187700(\alpha - 1)y) \left(\frac{1}{T_k} - \frac{1}{T_n} \right) + 57850\beta] \end{aligned} \quad (4)$$

Левая часть $100\eta\Delta H$ соответствует полезной части теплового эффекта сгорания, отнесенной к расчетной базе 100 г топлива, что согласуется с использованием энтальпии в единицах кал/г и введением коэффициента полезного действия η . Правая часть уравнения описывает суммарное изменение энтальпии продуктов сгорания при нагреве от начальной температуры T_n до конечной температуры T_k , причем каждая группа коэффициентов при величинах m ,

$\left(\frac{n}{2} + \frac{50}{9}\beta \right)$, q , $(3.76\alpha y + \frac{r}{2})$ и $(\alpha - 1)y$ непосредственно соответствует количествам молей CO_2 ,

H_2O , SO_2 , N_2 и избыточного O_2 , следующим из уравнения горения. Величины c_{pi} были введены в единицах кал/моль для соответствующих компонентов дымовых газов. Поскольку вывод уравнения проводился для 100 г топлива, приведенное выше уравнение можно напрямую использовать для расчета T_k как функции α и β , если T_n составляет 25 °C (298,16 K), а ΔH выражено в кал/г топлива.

Энергетический баланс процесса горения составлен с учетом нагрева продуктов сгорания до конечной температуры и фазовых превращений воды. Существенная роль водяного пара в формировании теплового баланса обуславливает необходимость учета энтальпии фазового перехода воды, поскольку затраты теплоты на испарение могут составлять значительную долю суммарного теплового эффекта реакции, что также отмечается в работах, посвященных термической утилизации водосодержащих отходов и осадков сточных вод.

Применение аналитических зависимостей теплоемкостей компонентов дымовых газов от температуры позволяет корректно описывать процесс нагрева газовой смеси в широком температурном диапазоне и существенно повышает точность определения температурного режима инсинератора.

Основные результаты и выводы

В работе разработана и обоснована методология инженерного расчета теплового и массового балансов инсинератора, предназначенного для термического обезвреживания жидких отходов. В основу подхода положено строгое термодинамическое описание процесса горения топлива обобщенного состава $C_m H_n O_p S_q N_r$ с учетом совместного сжигания водосодержащих отходов, представленных в виде чистой воды.

Получено обобщенное стехиометрическое уравнение горения, позволяющее учитывать влияние коэффициента избытка воздуха и соотношения массовых расходов топлива и отходов. Это обеспечивает универсальность предлагаемой модели и возможность ее применения для широкого спектра жидких отходов различного происхождения без необходимости детального химического анализа их состава.

Сформулирован энергетический баланс процесса горения, в котором учтены температурная зависимость теплоемкостей продуктов сгорания, фазовые превращения воды и реальный термический коэффициент полезного действия установки. Использование аналитических аппроксимаций теплоемкостей компонентов дымовых газов позволило получить замкнутое уравнение для определения конечной температуры продуктов сгорания, что существенно повышает точность расчетов по сравнению с традиционными методами, основанными на постоянных значениях теплофизических свойств.

Предложенный подход позволяет анализировать влияние основных эксплуатационных параметров инсинератора – коэффициента избытка воздуха, доли впрыскиваемых жидких отходов и характеристик вспомогательного топлива – на температурный режим работы установки. Это создает предпосылки для улучшения параметров режимов сжигания, повышения энергетической эффективности процесса и обеспечения соблюдения экологических нормативов по выбросам.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании новых установок термического обезвреживания жидких отходов, а также при модернизации и оптимизации режимов работы существующих инсинераторов, что подтверждается современными исследованиями в области термического обезвреживания жидких отходов [1].

Список литературы / References

[1] Никольский В. Термическое обезвреживание концентрированных жидких токсичных отходов и автоматический контроль эффективности процесса, *Экология и промышленность России*, 2017, 21(6), 24–30. [Nikolskii V. Thermal Neutralization of Concentrated Liquid Toxic Wastes and Automatic Control of Process Efficiency, *Ecology and Industry of Russia*, 2017, 21(6), 24–30 (in Russian)]

[2] Трошин К. Я., Беляев А. А., Арутюнов А. В., Арутюнов В. С. Воспламенение смесей метана и оксида углерода, *Физика горения и взрыва*, 2024, 60(3), 7–18. DOI: 10.15372/FGV2023.9320.

[Troshin K. Ya., Belyaev A. A., Arutyunov A. V., Arutyunov V. S. Ignition of Methane and Carbon Monoxide Mixtures, *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2024, 60(3), 7–18 (in Russian)]

[3] Carvalho J. A. Jr., Gotaç P. R. Heat and mass balance analysis of an incinerator for aqueous wastes, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 1993, 20, 535–544

[4] Кулагина Т. А., Соловьева Т. А. Модернизация котельных агрегатов с использованием циклонно-вихревых технологий сжигания топлива, *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2024, 17(8), 1028–1034. EDN: HBLRJT. [Kulagina T. A., Solovieva T. A. Modernization of Boiler Units Using Cyclone-Vortex Fuel Combustion Technologies, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. Technol.*, 2024, 17(8), 1028–1034 (in Russian)]

[5] Perry R. H., Chilton C. H. Chemical Engineers' Handbook. *New York: McGraw-Hill*, 1981. 1550

[6] Комплексная утилизация осадков городских сточных вод с использованием термических методов обработки, *Промышленная экология и технологии*, 2023. [Complex Utilization of Municipal Wastewater Sludge Using Thermal Treatment Methods, *Industrial Ecology and Technologies* (in Russian)]

Theoretical and Applied Heat Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: OCIAFK

УДК 536.24

**Experimental Study of Heat Exchange
and Friction in Start-Up Mode of Power Plant**

Yuriy G. Volodin*

*Kazan Branch «Volga State University of Water Transport»
Kazan, Russian Federation*

Received 17.11.2025, received in revised form 01.04.2026, accepted 19.05.2026

Abstract. The article presents the results of an experimental study of friction and heat transfer in a cylindrical tube. The results of the experiment showed that a sharp increase in the temperature of the gas stream contributes to the formation of thermal and hydrodynamic instability, which in combination with non-isothermal conditions create conditions that lead to a decrease in the efficiency of heat transfer. This process is facilitated by the dynamics of the process of increasing the temperature of the flow, starting from the threshold of 3000 K/c and more.

Keywords: experiment, nonstationarity, heat transfer, efficiency of the heat transfer.

Citation: Volodin Yu. G. Experimental Study of Heat Exchange and Friction in Start-Up Mode of Power Plant. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(5), 612–620. EDN: OCIAFK



**Экспериментальное исследование теплообмена и трения
в пусковом режиме энергетической установки**

Ю. Г. Володин

*Казанский филиал ФГБОУ ВО
«Волжский государственный университет водного транспорта»
Российская Федерация, Республика Татарстан, Казань*

Аннотация. В статье приводятся результаты экспериментального исследования трения и теплоотдачи в цилиндрической трубе. Результаты эксперимента показали, что резкое увеличение температуры газового потока способствует формированию тепловой и гидродинамической

нестационарности, которые в сочетании с неизотермичностью создают условия, приводящие к снижению эффективности теплоотдачи. Данному процессу способствует динамика процесса нарастания температуры потока, начиная с порога 3000 K/с и более.

Ключевые слова: эксперимент, нестационарность, теплоотдача, эффективность теплоотдачи.

Цитирование: Володин Ю.Г. Экспериментальное исследование теплообмена и трения в пусковом режиме энергетической установки / Ю.Г. Володин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(5). С. 612–620. EDN: OCIAFK

Введение

Нестационарные процессы, происходящие в динамических и тепловых пограничных слоях, вызывали и вызывают интерес не только у исследователей, но и у конструкторов, специалистов по эксплуатации оборудования и других специалистов. Нестационарные процессы разделяют на пульсирующие и апериодические. К последнему случаю относятся, например, пусковые режимы энергосиловых установок, когда топливо подается в камеру сгорания и воспламеняется. За короткий промежуток времени в камере сгорания изменяются параметры рабочего тела – плотность и вязкость, формируется и развивается тепловой пограничный слой [1]. Динамический пограничный слой испытывает на себе соответствующие воздействия в связи с изменением тепловой обстановки [2]. Нестационарные процессы широко представлены в литературных источниках, однако практически отсутствует информация о тепловых высокодинамических процессах [3].

Эффективность теплоотдачи оценивают параметром аналогии Рейнольдса $S=2St/C_f$, представляющим собой отношение коэффициента теплоотдачи к коэффициенту трения. Известно, что в условиях внутренней задачи, например при торможении потока, теплоотдача увеличивается, а при ускорении, наоборот, снижается [4]. Иногда снижение теплоотдачи бывает если предсказуемым, то количественно неожиданным, как у профессора Дейча М. Е. при исследовании обтекания сферы. Обнаруженное явление было названо «обратным переходом», или «ламинаризацией» турбулентного пограничного слоя [5]. Удовлетворением интереса к этому явлению служат ряд работ [6–9], в которых явление ламинаризации исследовалось в условиях внутренней задачи и было получено при различных видах воздействий – отрицательный продольный градиент давления, отсос пограничного слоя, охлаждение или нагрев стенки канала и др. Из названных работ выделяется [10], в которой экспериментально исследовалась структура динамического и теплового пограничных слоев. Оказалось, что при проявлении эффекта ламинаризации турбулентного пограничного слоя последний остается турбулентным, а механизм турбулентного переноса значительно снижается. В результате более чем в два раза снижается величина коэффициента теплоотдачи St и нарушается аналогия Рейнольдса.

Экспериментальный стенд

Для изучения теплообменных и газодинамических процессов был разработан и изготовлен экспериментальный стенд. Основой стенда является разомкнутый газодинамический контур, в котором в качестве генератора тепла используется плазмотрон 1 (рис. 1). Плазмотрон позволяет за очень короткий промежуток времени достичь высоких степеней нагрева рабочего тела. Для чистоты эксперимента необходимо на входе в экспериментальный канал сформировать равномерные профили скорости и температуры. Это достигается путем пристыковки

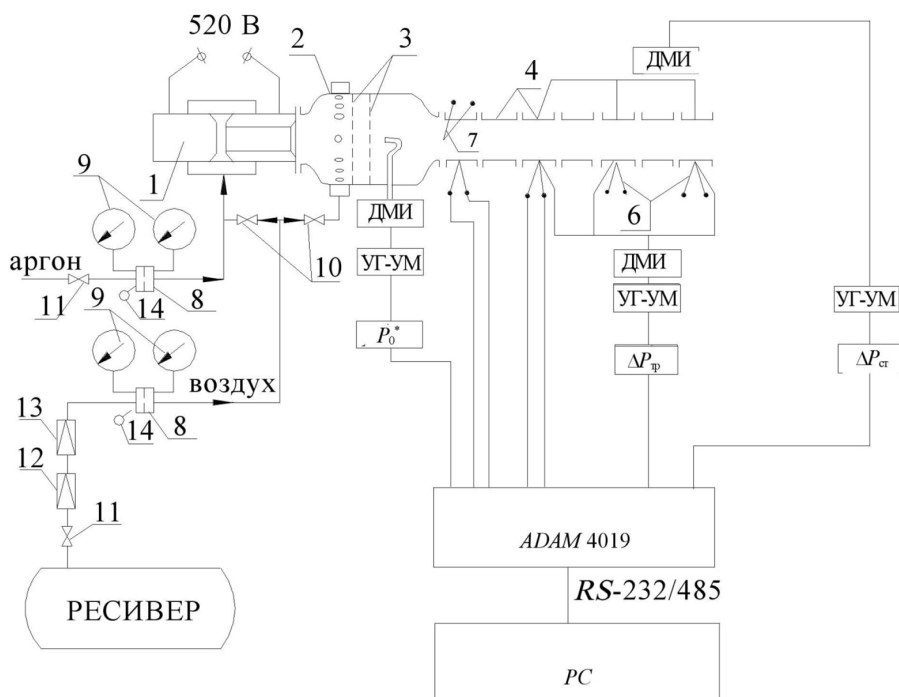


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда

Fig. 1. Principal design of the experimental stand

к плазматрону форкамеры 2 с соплом, спрофилированным по кривой Витошинского [11]. Внутри форкамеры установлены выравнивающие решетки 3 [12], а перед ними просверлены двенадцать радиальных отверстий, через которые подается воздух, минуя плазматрон, что позволяет варьировать величиной температуры рабочего тела и скоростью ее нарастания. К выходу сопла крепится экспериментальный канал 4, состоящий из семи секций диаметром и длиной 45 мм с толщиной стенки 0,08 мм, изготовленных из нержавеющей стали. Воздух, подаваемый в плазматрон, поступал из ресивера, в который закачивался компрессором и проходил через фильтры грубой 12 и тонкой 13 очистки и запорно-регулировочную арматуру 10 и 11. В состав измерительно-регистрирующей системы входили первичные преобразователи, согласующие устройства и регистратор. Расход рабочего тела (воздуха) измерялся расходомером переменного перепада давления, который не входил в измерительно-регистрирующую систему. Температуры измерялись микротермопарами [13, 14] с диаметром термоэлектродных проводов 65 микронов, давления – индуктивными датчиками давления ДМИ-0,1–2 в комплекте с приборами УГ-УМ. Хромель-алюмелевой термопарой 7 измерялась температура рабочего тела на входе в экспериментальный канал. Хромель-копелевыми термопарами 6 измерялась температура стенки канала в функции продольной координаты и времени. Концы термоэлектродных проводов, раскатанные до 20 микронов, приваривались к наружной поверхности канала в середине 1-й, 3-й, 5-й и 7-й секций канала. Измерение полного давления проводилось в форкамере трубкой полного напора в форме «лебединой шеи» [15]. Касательные напряжения трения изменялись методом «трубка-выступ» [16, 17].

Результаты исследований

Экспериментальные исследования проведены в интервале среднерасходного числа Рейнольдса от 30000 до 60000. При этом температура рабочего тела в приосевой области изменялась в диапазоне $T = 293\text{--}1500\text{ K}$ с увеличением температуры потока до 12000 K/с и скорости потока до 700 м/с² (рис. 2). Были посчитаны среднеквадратичные погрешности [18], величины которых не превысили значений при определении температуры 0,75 %, скорости потока 1,6 %, коэффициентов трения и теплоотдачи соответственно 9,2 % и 9,5 %.

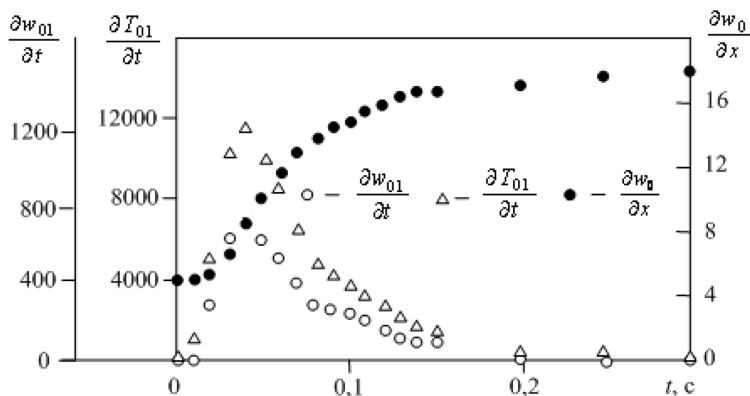


Рис. 2. Изменения во времени производных скорости и температуры потока

Fig. 2. Changes in the time of the derivatives of velocity and flow temperature

Резкое увеличение температуры газового потока в потенциальной области и скорости потока формируют тепловую и гидродинамическую нестационарности, которые, в свою очередь, изменяют величины коэффициентов трения и теплоотдачи (рис. 3–4). С изменением температуры потока изменяются теплофизические свойства рабочего тела, такие как плотность и вязкость, и, следовательно, изменяются параметры пограничных слоев и течения в целом. В динамическом пограничном слое увеличение температуры потока сопровождается изменением интегральных характеристик [19], а перестройка кинематической структуры приводит к увеличению пристеночных касательных напряжений трения [2]. На рис. 3 представлен график зависимости коэффициента трения в функции характерного числа Рейнольдса. На графике показана следующая динамика исследуемого процесса: 2500 K/с и 150 м/с² (точки обозначены ромбом), 6000 K/с и 350 м/с² (квадрат), 12000 K/с и 700 м/с² (треугольник). Увеличение температуры потока и его динамики приводят к большему нарастанию величины коэффициента трения, который определяется по выражению:

$$\frac{C_f}{2} = \frac{\tau_w}{\rho_0 w_0^2}. \quad (1)$$

Массовая скорость в знаменателе – величина постоянная по условиям эксперимента. Таким образом, коэффициент трения повторяет характер изменения касательных напряжений трения τ_w . В эксперименте, кроме перепадов давления на датчиках «трубка-выступ», измерялось полное давление в форкамере P_0^* и статические давления в каждом контрольном сечении,

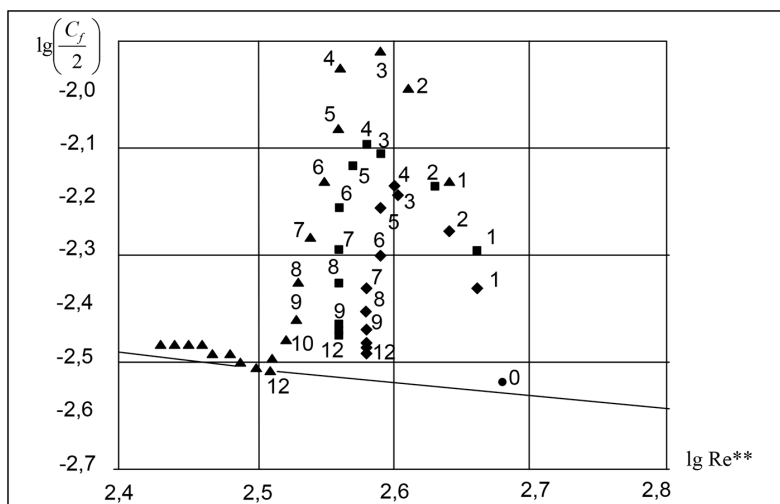


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения C_f от характерного числа Re_h^{**} . Цифры обозначают время: 1–0,01 с; 2–0,02 с; ...; 12–0,12 с

Fig. 3. Dependence of the friction coefficient C_f from the Reynolds characteristic number Re_h^{**} . The digits indicate the time: 1–0,01 с; 2–0,02 с; ...; 12–0,12 с

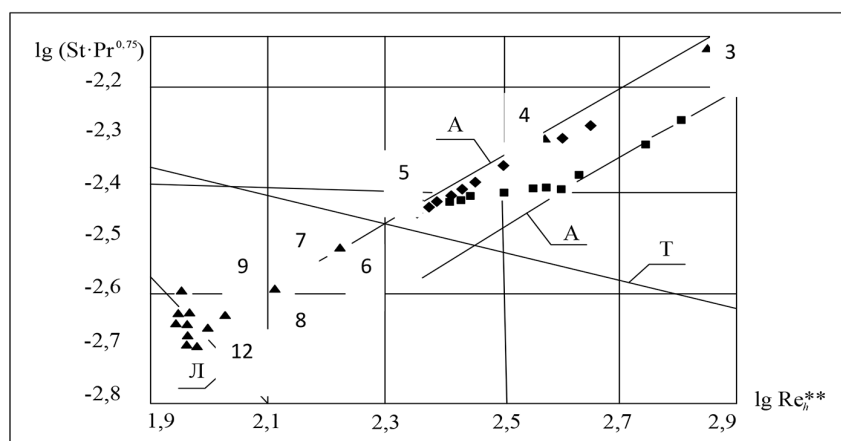


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплоотдачи St от числа Re_h^{**} . Цифры обозначают время: 3–0,03 с; 4–0,04 с... 12–0,12 с

Fig. 4. Dependence of the heat transfer coefficient St from the number of Re_h^{**} . The digits indicate the time: 3–0,03 с; 4–0,04 с... 12–0,12 с

разность которых равна $\Delta P = \frac{\rho_0 w_0^2}{2}$. К моменту времени 0,12 с нестационарный процесс можно считать законченным, поскольку экспериментальные точки группируются около стандартной зависимости для турбулентных режимов течения.

С увеличением температуры потока формируется тепловой пограничный слой. Измеренные в эксперименте температура потока в приосевой области и температура стенки в функции продольной координаты и времени позволили определить параметры теплового пограничного слоя. Увеличение температуры потока сопровождается прогревом пограничного слоя и уве-

личением температуры стенки канала. Причем если с начала эксперимента временная производная температуры стенки канала увеличивается, что вполне логично, то начиная с момента времени 0,06 с производная имеет постоянную величину, т.е. стенка канала прогревается с постоянной скоростью. Плотность теплового потока, определяемая по выражению:

$$q_w = C_{pw} \rho_w \Delta_w \frac{\partial T_w}{\partial t} + \Delta q_w, \quad (2)$$

также имеет постоянную величину с момента 0.06 с. Здесь Δq_w – потери тепла, обусловленные свободной конвекцией и лучистым теплообменом, ввиду отсутствия теплоизоляции наружной поверхности канала, которые не превысили 5 %. Коэффициент теплоотдачи α определялся по закону Ньютона:

$$\alpha = \frac{q_w}{t_0^* - t_w}, \quad (3)$$

а характеризующий перенос тепла от газового потока к стенкам канала критерий Стантона выражением:

$$St = \frac{q_w}{\rho_0 w_0 (h_0^* - h_w)}. \quad (4)$$

На графике рис. 4 кроме экспериментальных точек построены прямые: Т – стандартный закон теплоотдачи для турбулентных режимов течения:

$$St_0 = \frac{0,0128}{Re_h^{**0,25} Pr^{0,75}}, \quad (5)$$

Л – стандартный закон теплоотдачи для ламинарных режимов течения:

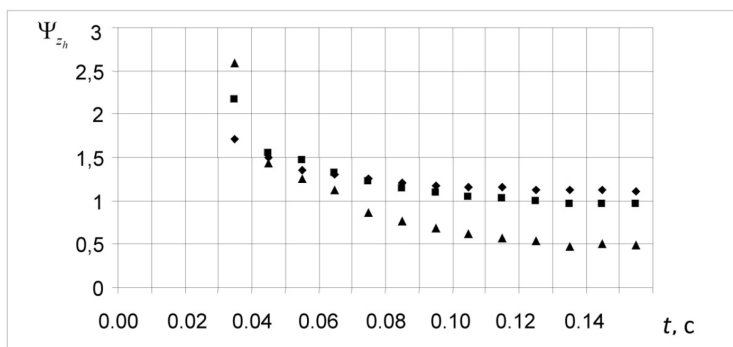
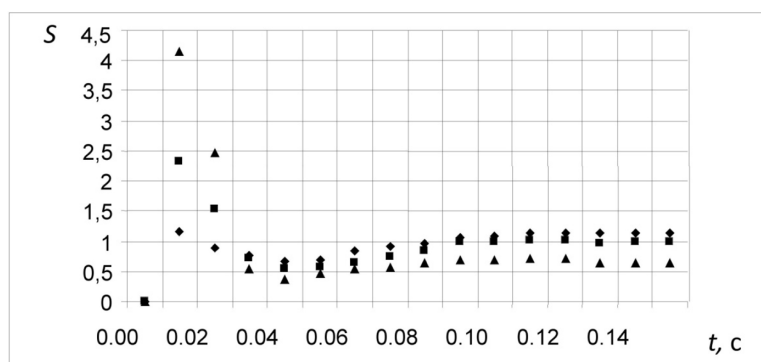
$$St_0 = \frac{0,22}{Re_h^{**} Pr^{4/3}},$$

А – аппроксимационное выражение:

$$\Psi_{zh} = \frac{St}{St_0} = \frac{1}{w_0^2} \frac{\partial w_0}{\partial t} \sqrt{\frac{1}{Re_h^{**}} \frac{1}{\Delta h} \frac{d(\Delta h)}{dt}}.$$

Отслеживая перемещения экспериментальных точек, удалось определить величину производной температуры потока по времени – около 3000 градусов в секунду. С этого порога начинает снижаться величина коэффициента теплоотдачи ниже стандартного значения при увеличении температуры газового потока и уменьшении числа Re_h^{**} . На графике видно, что экспериментальные точки мигрируют в нижний левый угол и группируются около прямой Л. Данный факт свидетельствует о ламинаризации теплового турбулентного пограничного слоя (ТПС). Из анализа выражения (4), по которому определялась величина коэффициента теплоотдачи St , следует, что причиной ламинаризации ТПС является неизотермичность (так как массовая скорость и тепловой поток не изменяются во времени) и параметром ламинаризации следует определить температурный фактор Ψ_h или температурный напор ΔT . По изменению величины последнего определены границы области ламинаризации ТПС $\Delta T \geq 700 \text{ K}$ и переходной области от 350 до 700 K.

На рис. 5 построен график, показывающий изменения величины относительного коэффициента теплоотдачи в функции временной координаты. В рассматриваемом самом динамичном режиме относительный коэффициент теплоотдачи изначально принимает наиболее макси-

Рис. 5. Изменение во времени относительных коэффициентов теплоотдачи Ψ_{zh} Fig. 5. Change in the relative coefficients of heat transfer over time Ψ_{zh} Рис. 6. Изменение во времени параметра S аналогии РейнольдсаFig. 6. The change in time of the Reynolds analogy parameter S

мальную величину. Его значения, как и в других режимах, плавно уменьшаются и, в отличие от двух других, к окончанию нестационарного процесса принимают значение 0,5.

Изменения во времени параметра S аналогии Рейнольдса представлены на графике рис. 6. Во всех трех режимах наблюдается нарушение аналогии Рейнольдса, но более существенно это имеет место в третьем режиме, когда S принимает минимальную величину, равную 0,38. Затем ситуация несколько улучшается с небольшим увеличением параметра. В целом в рассмотренной ситуации можно констатировать нарушение аналогии Рейнольдса, в особенности при высокой динамике нарастания температуры газового потока, и, как следствие, существенное снижение эффективности переноса тепла до 50 с лишним процентов. Следует отметить, что в рассмотренном процессе резкого увеличения температуры газового потока коэффициент трения, как видно на рис. 3, консервативен к происходящему в тепловом пограничном слое.

Выводы

При резком увеличении температуры газового потока формируются тепловая и гидродинамическая нестационарности, причем чем выше динамика процесса, тем сильнее проявляются эффекты нестационарности, которые совместно с неизотермичностью создают

условия по снижению эффективности теплоотдачи. Факт снижения интенсивности переноса тепла весьма важен во многих отраслях промышленности, особенно при определении теплонпряженных участков в конструкциях и элементах как энергосиловых установок, так и теплообменных и технологических аппаратов, и решении вопросов от перегрева этих участков.

Список литературы / References

- [1] Volodin Y.G., Fedorov K.S., Yakovlev M.V. Nonstationary effects and heat exchange in starting conditions of power plants. *Russian Aeronautics*, 2006, 49(4), 63–68.
- [2] Volodin Y.G., Fedorov K.S., Yakovlev M.V. Unsteady effects and friction in the starting regime of power plants. *Russian Aeronautics*, 2006, 49(1), 49–52.
- [3] Volodin Y.G., Marfina O.P., Kirpichnikov A.P. Features of heat transfer at increase of temperature of the working body, intensive up to 12000 K/s. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1328 (1).
- [4] Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. *Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое*: монография. М.: Энергия, 1972. 342 с. [Kutateladze S.S. and Leontiev A.I. *Heat and Mass Transfer and Friction in a Turbulent Boundary Layer: A Monograph*. Moscow: Energiya, 1972. 342 p. (in Russian)]
- [5] Дейч М.Е., Лазарев Л.Я. Исследование перехода турбулентного пограничного слоя в ламинарный. *Инженерно-физический журнал*, 1964, 7(4), 18–24 [Deutsch M.E., Lazarev L. Ya. Investigation of the Transition of a Turbulent Boundary Layer to a Laminar One. *Engineering Physics Journal*, 1964, 7(4), 18–24 (in Russian)]
- [6] Бэк Л.Х., Мэссье П.Ф., Каффел Р.Ф. Ламинаризация турбулентного пограничного слоя при течении в сопле. *Ракетная техника и космонавтика*, 1969, 7(4), 194–196 [Back L.H., Massie P.F., and Kaffel R.F. Laminarization of the Turbulent Boundary Layer in a Nozzle. *Rocket Science and Astronautics*, 1969, 7(4), 194–196 (in Russian)]
- [7] Datton R.A. The Effects of Distributed Suction on the Development in Turbulent Boundary Layer. *Report and Memoranda № 3155*. Cambridge: Engineering Laboratory, 1958. 16 p.
- [8] Wisniewski R.E., Jack J.R. Recent Studies on the Effect of Cooling on Boundary Layers Transition at Mach 4. *J. of the Aerospace Sci.*, March, 250.
- [9] Бэнкстон К.А. Переход от турбулентного течения газа к ламинарному в нагреваемой трубе. *Труды Американского общества инженеров-механиков серия. Серия: С. Теплопередача*, 1970, 92(4), 1–20 [Bankston, K. A. Transition from Turbulent Gas Flow to Laminar Flow in a Heated Pipe. *Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers, Series: C. Heat Transfer*, 1970, 92(4), 1–20 (in Russian)]
- [10] Леонтьев А.И., Шишов Е.В. Закономерности пристенной турбулентности в градиентной области течения и при сложных тепловых граничных условиях. *Пристенные турбулентные течения*. Новосибирск: ИТФ, 1984, 105–111 [Leontiev A.I., Shishov E.V. Patterns of wall-bounded turbulence in the gradient flow region and under complex thermal boundary conditions. *Wall-bounded turbulent flows*. Novosibirsk: ITF, 1984, 105–111 (in Russian)]

- [11] Бошняк Л.Л. *Измерения при теплотехнических исследованиях*. М.: Машиностроение, 1974. 447 с. [Boshnyak, L.L. *Measurements in Thermal Engineering Research*. Moscow: Mashinostroenie, 1974. 447 p. (in Russian)]
- [12] Повх И.Л. *Аэродинамический эксперимент в машиностроении*. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1974. 479 с. [Povkh I.L. *Aerodynamic Experiment in Mechanical Engineering*. Leningrad: Mashinostroenie, Leningrad Branch, 1974. 479 p. (in Russian)]
- [13] Володин Ю.Г., Закиров И.Ф., Федоров К.С., Яковлев М.В. Исследование тепловой инерционности микротермопар. *Датчики и системы*, 2007, 6, 33–35 [Volodin Yu.G., Zakirov I.F., Fedorov K.S., Yakovlev M.V. Research of Thermal Inertia of Microthermocouples. *Sensors and Systems*, 2007, 6, 33–35 (in Russian)]
- [14] Ярышев Н.А. *Теоретические основы измерения нестационарных температур*. Л.: Энергия, 1990. 256 с. [Yaryshev N.A. *Theoretical Foundations of Measurement of Non-Stationary Temperatures*. Leningrad: Energiya, 1990. 256 p. (in Russian)]
- [15] Петунин А.Н. *Измерение параметров газового потока*. М.: Машиностроение, 1974. 260 с. [Petunin, A.N. *Measurement of Gas Flow Parameters*. Moscow: Mashinostroenie, 1974. 260 p. (in Russian)]
- [16] Володин Ю.Г., Марфина О.П., Богданов А.Н., Цветкович М.С., Кузнецов А.Б. Измерение касательных напряжений трения в нестационарном газовом потоке. *Датчики и системы*, 2009, 2, 34–36 [Volodin Yu.G., Marfina O.P., Bogdanov A.N., Tsvetkovich M.S., Kuznetsov A.B. Measurement of Frictional Tangential Stresses in a Non-Stationary Gas Flow. *Sensors and Systems*, 2009, 2, 34–36 (in Russian)]
- [17] Репик Е.У., Кузенков Б.К. Исследование нового метода опытного определения поверхностного трения в турбулентном пограничном слое. *Инженерно-физический журнал*, 1980, 38(2), 197–200 [Repik E.U., Kuzenkov B.K. Research of a New Method for Experimental Determination of Surface Friction in a Turbulent Boundary Layer. *Engineering Physics Journal*, 1980, 38(2), 197–200 (in Russian)]
- [18] Володин Ю.Г. *Об определении погрешностей в нестационарном теплофизическом эксперименте*. Казань, 1986. 7 с. – Деп. в ОНИИТЭХИМ г. Черкассы. 16.01 1986. № 201 хп – 86 [Volodin Yu.G. *On Determining Errors in a Non-Stationary Thermophysical Experiment*. Kazan, 1986. 7 p. – Deposited at ONIITEKHIM, Cherkassy. 16.01.1986. No. 201 hp-86 (in Russian)]
- [19] Володин Ю.Г., Марфина О.П. *Математическое моделирование пусковых режимов энергетических установок*. СПб.: «Инфо-да», 2007. 128 с. [Volodin Yu.G., Marfina O.P. *Mathematical Modeling of Starting Modes of Power Plants*. St. Petersburg: Info-da, 2007. 128 p. (in Russian)]

Theoretical and Applied Heat Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: HXL SOZ

УДК 620.91

Investigation of the ASH Content of Mixed Pellets

Elena N. Grigorieva*

*Volga State University of Technology
Yoshkar-Ola, Russian Federation*

Received 28.11.2025, received in revised form 01.04.2026, accepted 19.05.2026

Abstract. By using a mixture of wood and other fuels for the production of fuel pellets, it is possible to reduce the negative effects on the forest balance due to deforestation, as well as reduce competition between producers who use wood raw materials in the energy sector and in the production of a number of different products, such as chipboard. The process of making mixed pellets from linden with coal dust and linden with peat with the addition of starch as a binder is described. The relevance of the use of mix pellets in the territory of the Republic of Mari El is substantiated, as well as scientific and practical significance with a brief review of the literature on this issue. The comparison of the ash content parameters of mixed pellets with different percentages of lime and coal dust, lime and peat is given. During the comparison of the indicators, it was found that in order for the mix pellets to meet the ENplus – B standards, the amount of coal dust in the initial mixture should not exceed 10 %, and the amount of peat should not exceed 16 %. Thus, it can be concluded that it is possible to select the optimal composition of raw materials for the production of fuel pellets that will meet the standards in the field of ash formation during combustion.

Keywords: coal dust, peat, mixed pellets, ash content.

Citation: Grigorieva E. N. Investigation of the ASH Content of Mixed Pellets. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(5), 621–628. EDN: HXL SOZ



Исследование показателей зольности микс–пеллет

Е. Н. Григорьева

*Поволжский государственный технологический университет
Российская Федерация, Йошкар-Ола*

Аннотация. Используя для производства топливных пеллет смесь древесины с другими видами топлива, можно добиться снижения негативных последствий для лесного баланса из-за вырубki древесины, а также уменьшить конкуренцию между производителями, которые используют древесное сырье в энергетике и при производстве целого ряда различной продукции, например древесно-стружечных плит. Описан процесс изготовления микс-пеллет из липы с пылью каменного угля и липы с торфом с добавлением крахмала в качестве связующего вещества. Обоснована актуальность использования микс-пеллет на территории Республики Марий Эл, а также научная и практическая значимость с кратким обзором литературы по данному вопросу. Приводится сравнение параметров зольности микс-пеллет при различном процентном соотношении в них липы и пыли каменного угля, липы и торфа. В ходе сравнения показателей получено, что для соответствия микс-пеллет стандартам ENplus – В количество пыли каменного угля в исходной смеси не должно превышать 10 %, количество торфа – 16 %. Таким образом, можно сделать вывод, что возможно подобрать оптимальный состав сырья для производства топливных пеллет, которые будут соответствовать стандартам в области образования золы при сжигании.

Ключевые слова: пыль каменного угля, торф, микс-пеллеты, зольность.

Цитирование: Григорьева Е. Н. Исследование показателей зольности микс–пеллет / Е. Н. Григорьева // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(5). С. 621–628. EDN: HXL SOZ

Введение

Использование деловой древесины для производства топливных пеллет негативно отражается на лесном балансе РФ, а также приводит к росту конкуренции между производителями пеллет и производителями других видов продукции из щепы, например древесно-стружечных плит (МДФ, ДСП, ДВП и др.).

Использование различных добавок при производстве топливных пеллет позволит снизить нагрузку на лесную отрасль. Например, торфяной фонд Республики Марий Эл (РМЭ) состоит из «566 месторождений и проявлений торфа с общими ресурсами 195,8 млн т. Основные запасы торфа сосредоточены в 6 районах республики: Килемарском – 84,2 млн т (43,0 %), Горномарийском – 29,7 млн т (15,2 %), Юринском – 20,9 млн т (10,7 %), Звениговском – 19,5 млн т (10,0 %), Параньгинском – 16,3 млн т (8,3 %), Медведевском – 9,9 млн т (5,1 %). Балансом запасов торфа учтено 138 месторождений площадью в границе промышленной глубины более 10 га с общими балансовыми запасами торфа при условной 40 % влаге – 114094 тыс. т. Разрабатываются 4 месторождения с балансовыми запасами торфа категории А – 14327 тыс. т [1].

Месторождений каменного угля в РМЭ нет, однако в топливно-энергетическом балансе республики его доля составляет около 10 %. Тендеры на покупку каменного угля в 2025 году достигли 42 млн руб. [2], что предусматривает его регулярные поставки в РМЭ и сниженную оптовую стоимость.

Таким образом, разработка технического решения по производству микс-пеллет из смеси древесины с пылью каменного угля и с торфом является актуальной задачей, имеющей научную и практическую значимость.

Вопросом производства микс-пеллет занимаются Копырин В. А., Калашников В. П. [3], Григорьев В. С., Мазалов Ю. А., Милованов Н. С., Морозов В. А., Рафаилов А. Г., Соловьев С. А., Сороковиков А. И. [4], Зимин И. Б., Михайлов А. И., Смирнов Д. А., Ильвис Ю. П., Сооляттэ В. Ю. [5, 6, 7], Рудой В. И., Батухтин А. Г. [8], Брыкин Д. М., Брыкин М. А., Сердюк В. В., Сердюк Д. В., Ашкинази Л. А. [9].

Цель работы – определение оптимального варианта состава сырья для микс-пеллет, при котором полученные гранулы будут соответствовать ENplus – В в области образования золы при сжигании.

Для выполнения поставленной цели необходимо было решить ряд задач:

- 1) описать процесс изготовления микс-пеллет из смеси липы и торфа, а также липы и измельченного каменного угля в различном процентном соотношении;
- 2) определить зольность полученных пеллет;
- 3) произвести оценку оптимального состава сырья, при котором микс-пеллеты будут соответствовать стандартам.

Методика исследования

Характеристика исследуемых образцов

При проведении исследований были использованы топливные микс-пеллеты, полученные из смеси липы и пыли каменного угля, липы и торфа в различном процентном соотношении (табл. 1). В качестве связующего вещества добавлен крахмал (3 %).

Таблица 1. Соотношение липы и пыли каменного угля, липы и торфа в исходном сырье

Table 1. The ratio of lime and coal dust, lime and peat in the feedstock

№ образца	1	2	3	4	5	№ образца	6	7	8	9	10
Липа, %	87	77	67	57	47	Липа, %	87	77	67	57	47
Крахмал, %	3	3	3	3	3	Крахмал, %	3	3	3	3	3
Пыль каменного угля, %	10	20	30	40	50	Торф, %	10	20	30	40	50

Сырье забивалось в матрицу и помещалось в гидравлический пресс ПГЛ-60 (рис. 1).

Температура прессования составляла 95 °С, давление – 30 МПа, время – 0,4 с. В процессе гранулирования были получены микс-пеллеты, представленные на рис. 2.

Методика проведения исследований зольности

Зольность микс-пеллет определялась по ГОСТу для биомассы [10].

Тигли были промаркированы и помещены в муфельную печь типа «РЕМ» 2/87 на 3 часа (рис. 3).



Рис. 1. Гидравлический пресс ПГЛ-60 и матрица гранулятора

Fig. 1. PGL-60 hydraulic press and granulator matrix



Рис. 2. Микс-пеллеты

Fig. 2. Mix pellets



Рис. 3. Муфельная печь типа «РЕМ» 2/87 и тигль с пеллетами

Fig. 3. Muffle furnace type “REM” 2/87 and crucible with pellets

Муфельная печь нагревалась до 575 ± 25 °C, в нее на 3 часа помещались пустые тигли. После завершения процедуры прокаливания тигли охлаждались в эксикаторе до комнатной температуры, затем взвешивались, а результат записывался. Точность взвешивания составляла 0,1 мг.

Процедура повторного прокаливания с последующим охлаждением продолжалась в течение 1 часа. Повторялись операции до тех пор, пока разница массы между взвешиваниями не стала менее 0,3 мг. Окончательная масса тигля записывалась как m_{cont} .

Далее в прокаленный тигель помещалось 1,0 г пробы микс-пеллет из опилок липы и измельченного каменного угля в первом случае и опилок липы и торфа во втором случае. Образец взвешивался с точностью 0,1 мг. Микс-пеллеты были заранее высушены при температуре 105 °C, а их масса вместе с тиглем записывалась как m_{od} .

Далее тигель с микс-пеллетами помещался в муфельную печь и выдерживался при температуре 575 ± 25 °C не менее 3 часов. При этом, чтобы предотвратить процесс воспламенения пеллет, муфельную печь «РЕМ» 2/87 сначала нагрели со скоростью примерно 10 К/мин до 250 °C и поддерживали эту температуру 30 мин, а затем нагревали ее до 575 ± 25 °C.

После процедуры озоления тигель с навеской помещался в эксикатор, охлаждался и взвешивался с точностью 0,1 мг, после чего производилась запись полученного результата.

Процедура контрольного прокаливания длилась в течение 1 часа и повторялась до тех пор, пока разница массы между взвешиваниями не стала менее 0,3 мг. Окончательная масса тигля с золой записывалась как m_{ash} .

Обработка результатов проводилась следующим образом.

Зольность пробы, высушенной перед испытанием при 105 °C, вычислялась по формуле:

$$\text{Зольность} = \frac{m_{\text{ash}} - m_{\text{cont}}}{m_{\text{od}} - m_{\text{cont}}} * 100, \quad (1)$$

где *зольность* – масса золы, отнесенная к массе, высушенной при 105 °C навески пробы, выраженная в процентах; m_{ash} – масса тигля с золой, г; m_{cont} – масса пустого тигля, г; m_{od} – начальная масса тигля с навеской пробы, высушенной при 105 °C, г.

Результаты и обсуждения

На рис. 4 представлены диаграммы зависимости показателя зольности микс-пеллет от процентного соотношения липы и торфа в исходной смеси и липы с пылью каменного угля. Зависимости описываются с помощью регрессионных уравнений (2), (3) и представляют собой полином третьей степени.

$$1: y = 0,1667x^3 - 1,5x^2 + 6,3333x - 3. \quad (2)$$

$$2: y = 0,25x^3 - 2,3929x^2 + 8,3571x - 6,2. \quad (3)$$

Из рис. 4 видно, что процентное содержание в исходном сырье как пыли каменного угля, так и торфа влияет на зольность микс-пеллет. При увеличении содержания пыли каменного угля с 10 до 50 % зольность выросла в 6 раз (от 2 до 12 %). При увеличении содержания торфа с 10 до 50 % зольность выросла в 7 раз (от 0 до 7 %). При сгорании микс-пеллеты с добавлением пыли каменного угля образуют почти в 2 раза больше золы, чем с торфом.

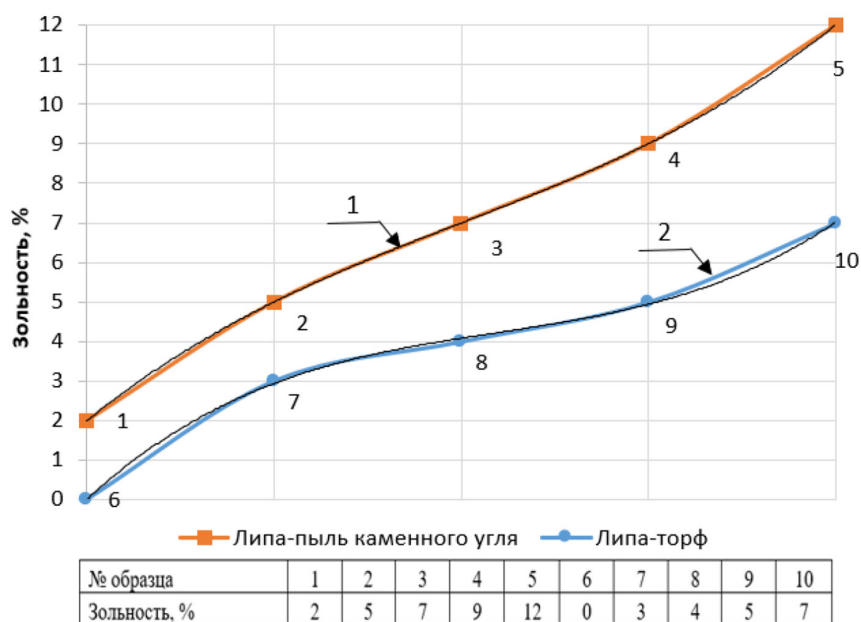


Рис. 4. Зольность микс-пеллет: липа – пыль каменного угля; липа – торф

Fig. 4. Ash content of mix pellets: lime – coal dust; lime – peat

Заключение

1. Микс-пеллеты изготавливались из смеси липы и пыли каменного угля, а также липы и торфа в различном процентном соотношении. В качестве связующего брали крахмал. Прессование осуществлялось в прессе ПГЛ-60 при следующих параметрах: температура прессования – 95 °С, давление – 30 МПа, время – 0,4 с.

2. Зольность микс-пеллет при добавлении в смесь пыли каменного угля почти в 2 раза выше, чем при добавлении торфа.

3. Стандарт ENplus – В предполагает зольность пеллет менее 2 %. Оптимальный состав сырья, при котором микс-пеллеты будут соответствовать этому параметру: содержание пыли каменного угля в исходной смеси – не более 10 %, а торфа – не более 16 %.

Таким образом, можно сделать вывод, что предлагаемый способ производства топливных микс-пеллет позволит использовать в качестве добавок твердое минеральное топливо, снизив нагрузку на лесной комплекс.

Список литературы/ References

[1] *Эколого-географический атлас Республики Марий Эл* [Электронный ресурс]. [Ecological and geographical atlas of the Republic of Mari El]. Access: <http://geol2.pf/atlas/2-2-полезные-ископаемые.html>.

[2] *Тендеры на Минералы, горные породы, уголь Республики Марий Эл* [Электронный ресурс]. [Tenders for Minerals, rocks, coal of the Republic of Mari El] Access: https://www.bicotender.ru/catalog/by-region/rossiya_privolzhskiy-fo_respublika-mariy-el_syre-polufabrikaty_mineraly-gornye-porody-ugol/.

[3] Копырин В.А., Калашников В.П. Патент 167871 Российская Федерация, МПК C10L (2006.01). *Водонепроницаемые пеллеты*: № 2016113106: заявл. 05.04.2016: опубл. 11.01.2017; заявитель ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет». [Kopyrin V.A., Kalashnikov V.P. Patent 167871 Russian Federation, IPC C10L (2006.01). *Waterproof pellets*: No. 2016113106: application 05.04.2016: published 11.01.2017; applicant Tyumen Industrial University (in Russian)]

[4] Григорьев В.С., Мазалов Ю.А., Милованов Н.С., Морозов В.А., Рафаилов А.Г., Соловьев С.А., Сороковиков А.И. Патент 2014132744 Российская Федерация, МПК C10L 5/44, C10L 5/10. *Пеллеты из прессованной биомассы*: № 2014132744: заявл. 08.08.2014: опубл. 29.09.2015; заявитель ФГБНУ ГОСНИТИ. [Grigoriev V.S., Mazalov Yu.A., Milovanov N.S., Morozov V.A., Rafailov A.G., Soloviev S.A., Sorokovikov A.I. Patent 2014132744 Russian Federation, IPC C10L 5/44, C10L 5/10. *Pellets from pressed biomass*: No. 2014132744: application 08.08.2014: published 29.09.2015; applicant GNU GOSNITI (in Russian)]

[5] Зимин И.Б., Смирнов Д.А., Михайлов А.И., Ильвис Ю.П. Инновационная технология производства и применения микс-пеллет в условиях агропромышленных предприятий. *Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии*, 2024, 3(48), 28–37. [Zimin I.B., Smirnov D.A., Mikhailov A.I., Ilves Yu.P. Innovative Technology of Production and Application of Mixed Pellets in Agro-industrial Enterprises. *Proceedings of the Velikiye Luki State Agricultural Academy*, 2024, 3(48), 28–37 (in Russian)]

[6] Зимин И.Б., Михайлов А.И. Анализ видов сырья для производства микс-пеллет в условиях агропромышленных предприятий. *Роль науки и современные тенденции сельскохозяйственного производства: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной Дню академии*, 2024, 85–89. [Zimin I.B., Mikhailov A.I. Analysis of raw materials for the production of mixed pellets in agro-industrial enterprises. *The role of science and current trends in agricultural production: Proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the Academy Day*, 2024, 85–89 (in Russian)]

[7] Зимин И.Б., Сооляттэ В.Ю. Особенности технологии производства топливных гранул (пеллет) на основе многокомпонентного древесного сырья в условиях крупных деревообрабатывающих предприятий. *Технологии и инновации: сборник научных статей научно-педагогических работников, аспирантов и обучающихся*, 2022, 131–134. [Zimin I.B., Soolatte V.Y. Features of the technology of production of fuel pellets based on multicomponent wood raw materials in the conditions of large woodworking enterprises. *Technologies and Innovations: a collection of scientific articles by research and teaching staff, graduate students and students*, 2022, 131–134 (in Russian)]

[8] Рудой В.И., Батухтин А.Г. Потенциал возможности применения микс-пеллет на основе древесины и угля на объектах теплоэнергетики. *Энергетика в современном мире: Сборник статей X Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции*, 2021, 129–131. [Rudoy V.I., Batukhtin A.G. The potential of using wood and coal-based mix pellets at thermal power facilities. *Energy in the modern world: Collection of articles of the X All-Russian (with international participation) Scientific and practical Conference*, 2021, 129–131 (in Russian)]

[9] Брыкин Д.М., Брыкин М.А., Сердюк В.В., Сердюк Д.В., Ашкинази Л.А. Патент 2011142879/04 Российская Федерация, МПК C10L 9/00, C10L 5/44. *Активные пеллеты*: 2011142879/04: заявл. 18.10.2011: опубл. 10.03.2013; заявитель Общество с ограничен-

ной ответственностью «TOTEK». [Brykin D.M., Brykin M.A., Serdyuk V.V., Serdyuk D.V., Ashkinazi L.A. Patent 2011142879/04 Russian Federation, IPC C10L 9/00, C10L 5/44. *Active pellets*: 2011142879/04: application. 18.10.2011: published. 10.03.2013; applicant Limited Liability Company “TOTEK” (in Russian)]

[10] ГОСТ Р 56881–2016. Биомасса. Определение зольности стандартным методом. Москва: Стандартинформ, 2016. [GOST R 56881–2016. *Biomass. Determination of ash content by the standard method*, 2016. Moscow: Standartinform, 2016 (in Russian)]

Metallurgy of Ferrous, Non-Ferrous and Rare Metals
Металлургия черных, цветных и редких металлов

EDN: EBZDFO

УДК 621.3

**Numerical Study of the Influence
of Technological Parameters on the Casting Regime
in an Electromagnetic Field**

**Maksim Yu. Khatsayuk^{a, b},
Eduard R. Vinter^{a, b}, Danil D. Dumolakas^{a, b},
Viktor N. Timofeev^{a, b} and Vladimir I. Barsukov^a**

^aSiberian Federal University

Krasnoyarsk, Russian Federation

^bResearch and Production Center of Magnetic Hydrodynamics

Krasnoyarsk, Russian Federation

Received 18.12.2025, received in revised form 31.03.2026, accepted 19.05.2026

Abstract. A comprehensive investigation of the influence of key technological parameters on the steady-state and transient regimes of the electromagnetic casting (EMC) process for small-diameter (25–33 mm) aluminum ingots was conducted using computational fluid dynamics methods. To solve the assigned tasks, a multiphase mathematical model was developed and verified. The model, implemented in ANSYS Fluent, includes magnetohydrodynamic (MHD) flows, free surface dynamics, and solidification. Particular attention is paid to the modeling and analysis of the mechanisms behind emergency situations, such as a full metal breakout upon sudden electromagnetic field shutdown, as well as the ingot pinch-off regime occurring with a significant increase in the inductor current. The influence of the solidus-liquidus temperature range and the method of defining the heat transfer coefficient on the casting process was also investigated. The results are consistent with experimental data on ingot geometry and microstructure.

Keywords: electromagnetic casting, electromagnetic crystallizer, numerical simulation, magnetohydrodynamics, aluminum alloys, electrotechnology, electrometallurgy, VOF, solidification.

Acknowledgements. This study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (Project No. 22–19–00128-P, “Structural Evolution of High-Strength Aluminum Alloys of the Al-Zn-Mg (Ni, Fe, Ca) System Produced Using Electromagnetic Casting Technology,” <https://rscf.ru/project/22–19–00128/>).

Citation: Khatsayuk M. Yu., Vinter E. R., Dumolakas D. D., Timofeev V. N., Barsukov V. I. Numerical Study of the Influence of Technological Parameters on the Casting Regime in an Electromagnetic Field. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(5), 629–641. EDN: EBZDFO



Численное исследование влияния технологических параметров на режим литья в электромагнитном поле

М. Ю. Хацаюк^{а, б}, Э. Р. Винтер^{а, б},
Д. Д. Думолакас^{а, б}, В. Н. Тимофеев^{а, б}, В. И. Барсуков^а

^аСибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск

^бНаучно-производственный центр магнитной гидродинамики
Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. В данной работе методами вычислительной гидродинамики проведено комплексное исследование влияния ключевых технологических параметров на установившийся и переходные режимы процесса электромагнитного литья (ЭМК) алюминиевых слитков малого диаметра (25–33 мм). Для решения поставленных задач была разработана и верифицирована многофазная математическая модель. Модель, реализованная в ANSYS Fluent, включает МГД-течения, свободную поверхность и кристаллизацию. Особое внимание уделено моделированию и анализу механизмов развития аварийных ситуаций, таких как полный пролив жидкого металла при внезапном отключении электромагнитного поля, а также режима пережата слитка, возникающего при значительном увеличении силы тока в индукторе. Также было исследовано влияние ширины температурного интервала солидус-ликвидус и способа задания коэффициента теплоотдачи на процесс литья. Результаты согласуются с экспериментальными данными по геометрии и микроструктуре.

Ключевые слова: электромагнитное литье, электромагнитный кристаллизатор, численное моделирование, магнитная гидродинамика, алюминиевые сплавы, электротехнология, электрометаллургия, VOF, кристаллизация.

Благодарность. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22–19–00128-П «Эволюция структуры высокопрочных алюминиевых сплавов системы Al-Zn-Mg (Ni, Fe, Ca), получаемых с использованием технологии электромагнитного литья», <https://rscf.ru/project/22–19–00128/>).

Цитирование: Хацаюк М. Ю. Численное исследование влияния технологических параметров на режим литья в электромагнитном поле / М. Ю. Хацаюк, Э. Р. Винтер, Д. Д. Думолакас, В. Н. Тимофеев, В. И. Барсуков // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(5). С. 629–641. EDN: EBZDFO

Введение

Современные требования к качеству алюминиевых слитков для ответственных применений в аэрокосмической и электронной промышленности стимулируют развитие прогрессивных методов литья. Одним из наиболее перспективных направлений является технология литья в электромагнитном кристаллизаторе (ЭМК), основанная на принципе бесконтактного удержания жидкого металла электромагнитным полем. Первые работы в этой области были выполнены Гецелевым в 1972 году [1], а дальнейшее развитие технологии привело к созданию метода ElmaCast® [2], позволяющего получать слитки диаметром 5–30 мм с уникальными характеристиками с мелкозернистой и высокооднородной структурой.

ЭМК представляет собой технологию, позволяющую получать алюминиевые слитки с характеристиками, недостижимыми для традиционных методов литья. Ключевые преимущества

технологии обусловлены комбинированным воздействием бесконтактного удержания слитка электромагнитным полем и интенсивных магнитогидродинамических (МГД) течений в жидкой фазе [3, 4].

Как показано в ряде работ, заготовки, полученные методом ЭМК, служат оптимальной основой для последующего деформирования, позволяя изготавливать изделия с повышенными прочностными и эксплуатационными характеристиками [5]. Кроме того, ЭМК открывает возможность производства новых классов алюминиевых сплавов [6], не поддающихся освоению традиционным литьем из-за склонности к образованию грубой неравновесной структуры. Уникальная исходная структура таких слитков также создает предпосылки для применения специальных режимов термической и механической обработки [7, 8], направленных на дальнейшее улучшение комплекса свойств конечной продукции.

Актуальность данного исследования определяется необходимостью углубленного понимания физических процессов, происходящих при электромагнитном литье. Несмотря на экспериментально подтвержденные преимущества технологии, включая высокую чистоту металла и мелкодисперсную структуру, сохраняется ряд нерешенных проблем. В частности, не изучено воздействие технологических параметров литья в условиях взаимного влияния кристаллизации, динамики свободной поверхности и развития турбулентных течений в условиях непрерывного вытягивания слитка в поле электромагнитных сил. Кроме того, недостаточно изучены переходные процессы при старте и остановке литья, имеющие критическое значение для стабильности технологического процесса.

Значительный научный и практический интерес представляет экспериментальное исследование упомянутых аспектов с применением современных методов и средств измерения параметров кристаллизации в условиях МГД-воздействия [9, 10]. Однако проведение таких исследований сопряжено со значительными материальными и трудовыми затратами, а практическая применимость их результатов может быть существенно ограничена. В этой связи широкое распространение получила практика использования методов междисциплинарного численного анализа для комплексного исследования электротехнологических процессов. Такой подход позволяет осуществлять оперативную выработку рекомендаций для разработки и эксплуатации промышленного оборудования при минимальных затратах.

Современные подходы к моделированию, представленные в работах [11–13], демонстрируют комплексный и универсальный характер. Тем не менее их применение к процессу ЭМК сопряжено с определенными ограничениями, поскольку они, как правило, не учитывают сопряженное влияние динамики фазового перехода (кристаллизации), динамики свободной поверхности и развития турбулентных течений в условиях непрерывного вытягивания слитка в поле электромагнитных сил. В частности, сохраняется острая необходимость в создании комплексных моделей, связывающих технологические параметры литья с характеристиками литой заготовки (параметры макро- и микроструктуры, размеры слитка, содержание включений и др.), что особенно важно для оптимизации режимов литья и снижения количества брака и риска развития аварийных ситуаций при масштабировании технологии.

Целью работы является комплексное численное исследование влияния основных технологических параметров на характеристики процесса литья алюминиевых слитков диаметром 25–33 мм, а именно – изучение динамики процесса начала литья, анализ влияния способа задания

коэффициента теплоотдачи и ширины температурного интервала кристаллизации. Также было выполнено исследование возникновения и развития аварийных режимов в процессе литья.

Краткое описание математической модели

При численном моделировании процесса принят ряд допущений, учитывающих особенности технологии. Электромагнитная задача решается в гармонической постановке. Индуктор заменяется эквивалентным токовым слоем с учетом распределения тока на глубине скин-слоя. Зависимости электро- и теплофизических свойств расплава от фазового состояния заданы ступенчато. Теплоотдача в зоне охлаждения моделируется коэффициентом теплоотдачи, зависящим от температуры кусочно-линейно.

Модель основана на системе дифференциальных уравнений магнитной гидродинамики, подробно описанной в [14]. Электромагнитное поле рассчитывается решением уравнения для комплексного векторного магнитного потенциала. Уравнение движения включает силы тяжести, поверхностного натяжения, демпфирования в двухфазной зоне и электромагнитные силы; уравнение энергии решается с учетом фазового перехода, а также учитывает электромагнитные источники тепла. Для учета турбулентности применяется SST-модель Ментера. Динамика свободной поверхности описывается методом VOF, процессы кристаллизации/плавления моделируются методом «Enthalpy porosity», использующим объемную долю жидкости и общее теплосодержание.

Расчет выполняется в осесимметричной постановке (координаты ρ, z). Схема расположения основных элементов модели приведена на рис. 1.

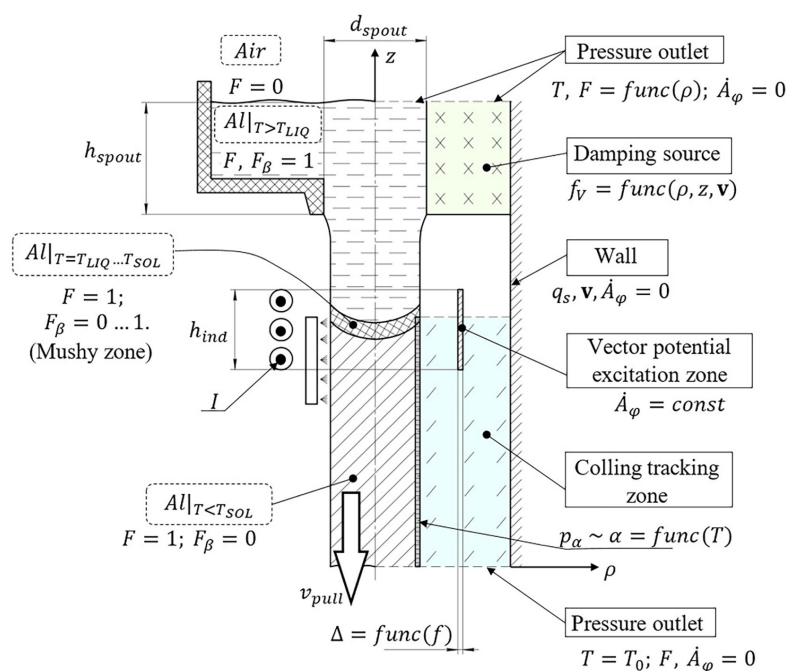


Рис. 1. Схема расположения основных элементов (слева от оси z) и соответствующая схема расчетной модели (справа от оси z)

Fig. 1. Layout diagram of the main elements (to the left of the z -axis) and the corresponding computational model schematic (to the right of the z -axis)

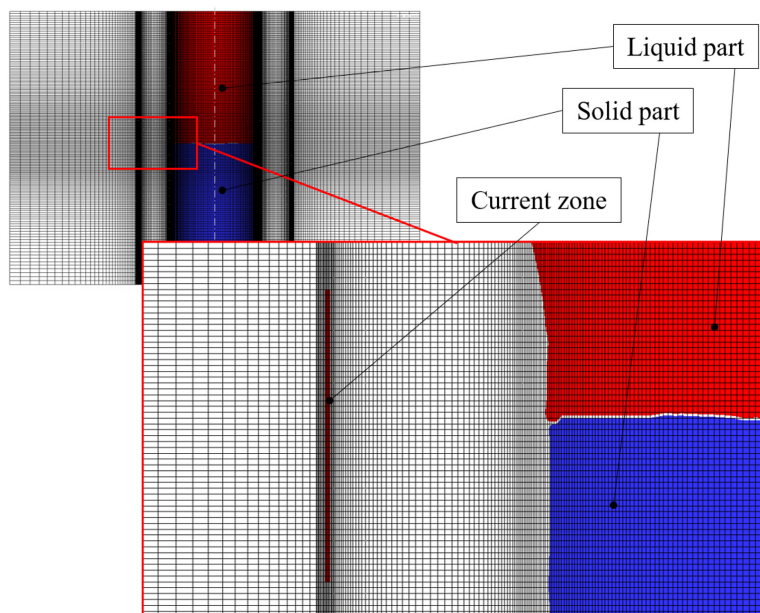


Рис. 2. Расчетная сетка модели

Fig. 2. Mesh of the Model

На границах задаются следующие условия: приток расплава через зону раздаточного лотка, дополнительное демпфирование движения среды в области лотка. Моделирование теплоотдачи с подвижной свободной поверхности слитка решается преобразованием поверхностного теплового потока в распределенный объемный сток тепла в приповерхностной зоне. Процесс вытягивания слитка моделируется движением расчетной области вниз с заданной скоростью литья. При расчетах используется структурированная ортогональная расчетная сетка, представленная на рис. 2, с нерегулярным сгущением в зонах с резкими градиентами величин.

Режим старта литья

Исследование стартового режима литья в электромагнитном кристаллизаторе (ЭМК) имеет важное практическое значение для отладки технологии. Эта стадия критична для оператора, так как определяет переход к стабильному литью. Срыв процесса приводит к простоему оборудования и дополнительным энергозатратам на поддержание расплава.

Из-за быстротечности процесса его динамику изучают теоретическими методами, включая компьютерное моделирование. Результаты численного моделирования переходных процессов показаны на рис. 3а, б и рис. 4.

Рассматриваются два типа старта, зависящих от начального положения затравки:

Мягкий старт: при включенном охлаждении оснастку вводят в литейный носик, подают расплав до рабочего уровня, после чего затравку перемещают вниз с последующим вытягиванием слитка. Моделирование показывает, что после опускания фронта кристаллизации ниже носика на поверхности слитка появляются наплывы. Стабилизация диаметра слитка и положения фронта кристаллизации занимает около 7 секунд.

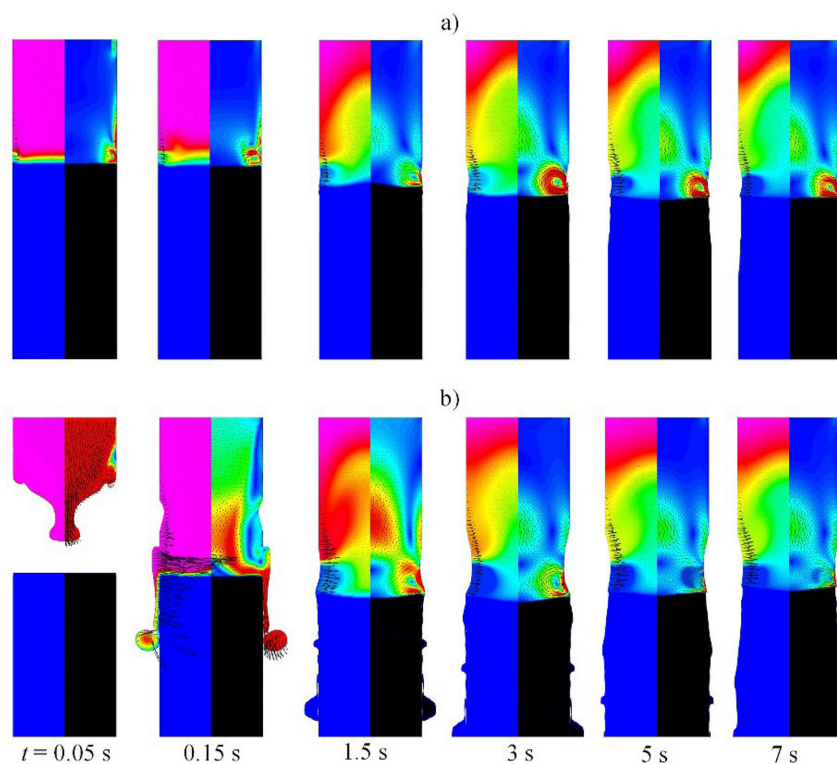


Рис. 3. Динамика развития мягкого (а) и грубого (б) старта литья

Fig. 3. Dynamics of Soft (a) and Rough (b) in Casting

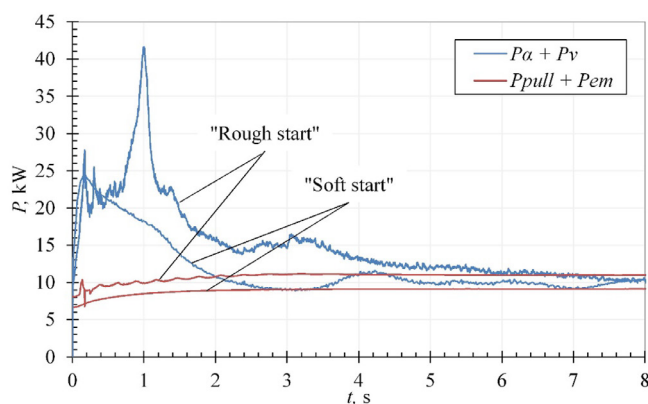


Рис. 4. Динамика изменения энергетических характеристик при мягком и грубом старте литья

Fig. 4. Dynamics of Energy Parameters during a Soft and a Rough Start

Грубый старт: затравка расположена на средней линии индуктора, расплав подается из литейного носика. Такой старт вызывает небольшие проливы расплава с краев затравки и образование крупных наплывов из-за удара струи о поверхность слитка. Под действием электромагнитных сил поверхность быстро стабилизируется и начинается вытягивание. В реальных условиях наплывы часто асимметричны и локализованы, что может привести к попаданию

наплыва в тянущие ролики и вызвать деформацию прутка, поскольку в верхней части слиток не фиксируется.

Анализ влияния способа задания коэффициента теплоотдачи

Определение коэффициента теплоотдачи (КТО) для систем с вынужденной конвекцией и фазовыми переходами охладителя представляет сложность, так как стандартные рекомендации часто неприменимы к вертикальным поверхностям с образованием газовой фазы, характерным для моделируемой системы литья. Рациональным решением является введение сложной зависимости КТО от температуры, что формирует зоны охлаждения в процессе расчета. Однако такой подход усиливает нелинейность задачи, потенциально снижая производительность и стабильность вычислений.

Для оценки влияния способа задания КТО сравнивались три варианта: два фиксированных значения ($1\text{E}3 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ – водяное охлаждение средней интенсивности и $1\text{E}5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ – охлаждение с кипением) и кусочно-линейная функция [15]. Результаты сравнительного анализа, представленные на рис. 5, 6, демонстрируют отсутствие взаимозаменяемости подходов.

Энергетические характеристики (интегральная мощность теплоотвода, рис. 6а) и динамика изменения объема жидкой фазы (рис. 6б) высокочувствительны как к величине, так и к способу задания КТО.

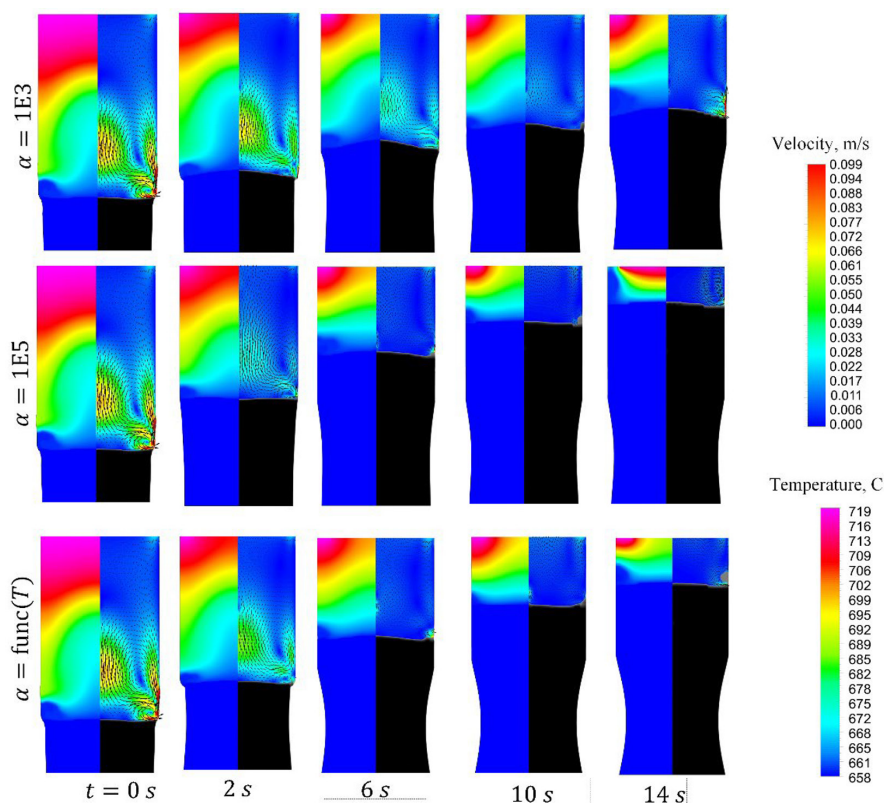


Рис. 5. Влияние величины и способа задания коэффициента теплоотдачи

Fig. 5. Influence of the Value and Application Method of the Heat Transfer Coefficient

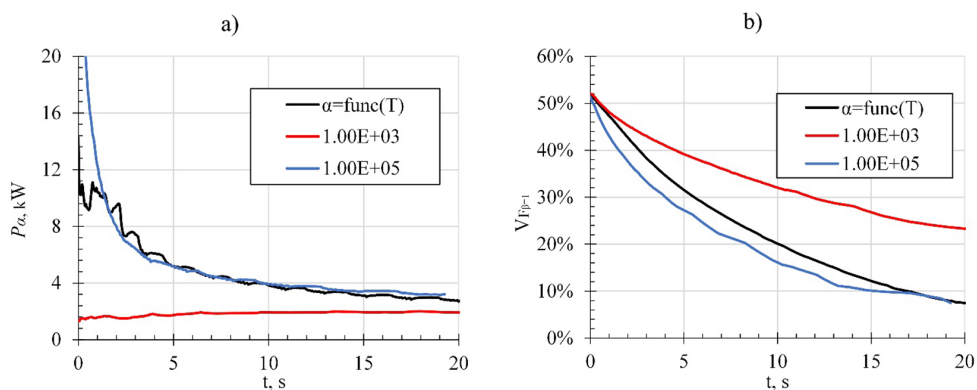


Рис. 6. Динамика изменения интегральной мощности теплоотвода с поверхности слитка (a) и относительного объема жидкой фазы (b)

Fig. 6. Dynamics of the Integral Heat Removal Power from the Ingot Surface (a) and the Relative Volume of the Liquid Phase (b)

В частности, в режиме без вытягивания (рис. 5) результаты моделирования с функциональной зависимостью КТО приближались к результатам с повышенным фиксированным значением ($1E5$ Вт/м²·К). Однако в режимах с перемещением слитка использование функции привело к проливу, тогда как повышенное фиксированное значение обеспечивало стабильное формирование слитка (несмотря на вытягивание фронта кристаллизации). Это указывает на необходимость пересмотра предыдущих исследований, использовавших фиксированный повышенный КТО.

Ключевым новым научным результатом является наблюдение формирования плоского фронта кристаллизации при стабильном литье слитков диаметром 25–30 мм практически для всех исследованных технологических параметров.

Положение и размер формирующихся естественных зон охлаждения при задании КТО функцией, наглядно представлены на рис. 7. Зона, находящаяся ближе всего к фронту кристаллизации, характеризует отвод тепла поднимающейся вдоль поверхности слитка пленкой из водяного пара, средняя зона является местом поверхности слитка, куда непосредственно попадает струя воды из охладителя, эта зона характерна наибольшим коэффициентом теплоотдачи за счет парообразования. Ниже этой зоны охлаждение осуществляется за счет стекания воды из охладителя вниз по поверхности слитка, в этой зоне нет смены агрегатного состояния охлаждающей жидкости, поэтому интенсивность охлаждения относительно невысокая. Описанные зоны охлаждения не являются фиксированными и существенно зависят от режимов литья. Следовательно, они не могут служить универсальной основой для проведения расчетов.

Влияние диапазона температур кристаллизации на процесс литья

Как известно, ширина зоны фазового перехода зависит от сплава и с усложнением его химического состава расширяется, учитывая большую номенклатуру алюминиевых сплавов с разной степенью легированности, целесообразно провести дополнительное моделирование литья в ЭМК сплавов с различной шириной интервала кристаллизации. Было проведено моделирование для $\Delta T_{\beta} = 2$ °C, $\Delta T_{\beta} = 20$ °C и 100 °C.

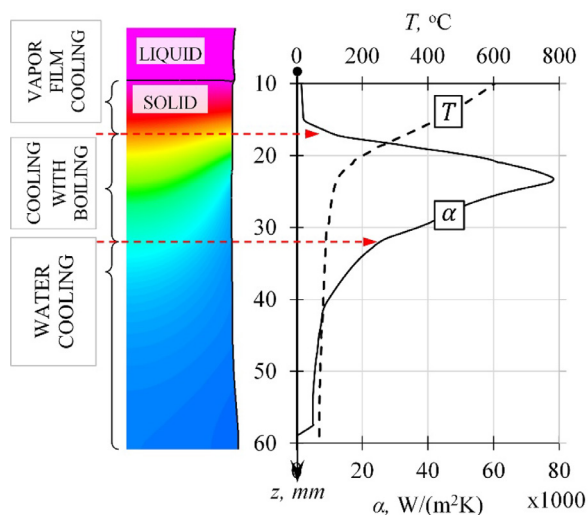


Рис. 7. Положение формирующихся зон охлаждения при задании коэффициента теплоотдачи как функции от температуры

Fig. 7. Position of the Forming Cooling Zones when the Heat Transfer Coefficient is Defined as a Function of Temperature

Результаты, приведенные на рис. 8, показали, что ΔT_β не оказывает значительного влияния на стабильность литья, форму свободной поверхности или положение фронта кристаллизации по сравнению с влиянием $A\beta$. Однако расширение интервала до 100 °C уменьшает масштаб и интенсивность вторичного МГД-вихря в жидкой фазе слитка. Также снижается выраженность температурного градиента в объеме жидкости, особенно в зоне фазового перехода у поверхности.

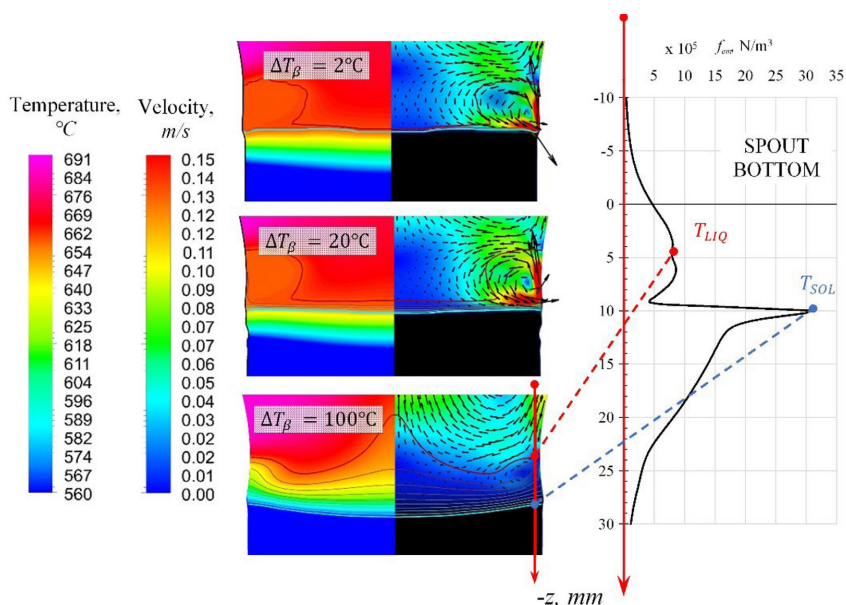


Рис. 8. Влияние ширины интервала кристаллизации на режим литья

Fig. 8. Influence of the Crystallization Interval Width on the Casting Regime

Анализ аварийных режимов

Численное моделирование с использованием построенной модели позволяет изучить механизм развития аварийных режимов, которые на практике протекают достаточно быстро. Наиболее нежелательным и губительным видом аварии в части литья в электромагнитный кристаллизатор является пролив металла. Пролив металла представляет опасность как для рабочих, так и для различных узлов оборудования.

Динамика развития данного вида аварии представлена на рис. 9. В частности, моделируется ситуация с резким снижением тока в индукторе до нуля в рабочем режиме литья.

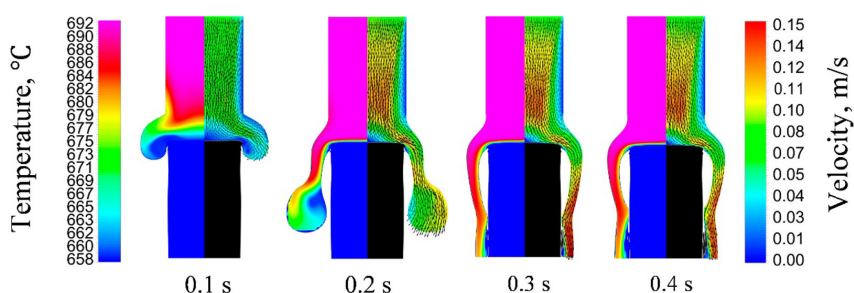


Рис. 9. Аварийный пролив металла

Fig. 9. Melt spilling

Процесс развивается достаточно стремительно, весь объем расплава в лотке в свободном падении устремляется вниз, растекаясь вокруг образованной твердой части слитка. При рабочем уровне расплава в лотке, соответствующем высоте жидкой фазы 49 мм, расход металла составил 0,877 кг/с. Пролив металла может возникать по различным причинам, однако во всех случаях общая динамика развития пролива будет выглядеть аналогично показанной выше.

Другим исследуемым аварийным режимом являлось пережатие расплава. Фактически данный режим является одним из возможных специальных режимов работы установки и в меньшей степени бывает аварийным. Тем не менее он представляет интерес как для создания новых технологических режимов литья в ЭМК, так и для развития технологии полуплывающей плавки и литья в целом. На рис. 10 представлены результаты компьютерной симуляции создания таких режимов из режима стабильного литья.

Для исследования использовались значения МДС 5000 А и 8000 А. Как было показано выше, степень обжатия слитка электромагнитными силами в первую очередь зависит от величины тока (в общем случае зависит квадратично). Таким образом, в начальный момент времени силы в жидкой фазе слитка возрастают примерно 5–6 раз в первом случае и 14–15 раз во втором. Далее, по мере увеличения степени обжатия, величина сил снижается, поскольку из-за изменяющейся величины зазора между индуктором и слитком изменяются параметры электромагнитной системы. В первом случае из-за действия сил поверхностного натяжения происходит разрыв жидкой фазы с образованием выраженного мениска.

Во втором случае обжатие происходит настолько сильно, что объем жидкой фазы сжимается в тонкий цилиндр, верхняя граница которого выходит за пределы расчетной области.

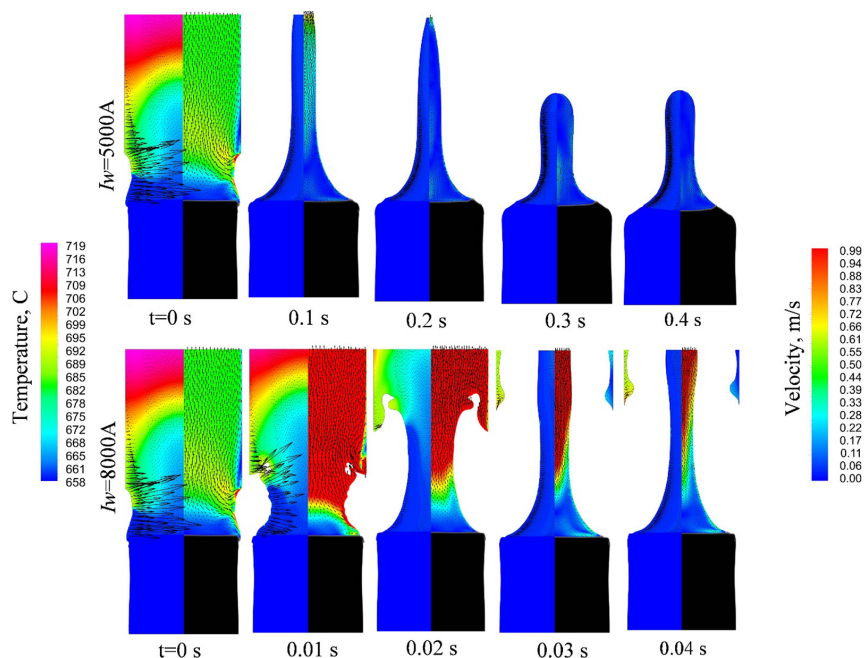


Рис. 10. Пережатие слитка

Fig. 10. Ingot Pinching

Также видно, что остатки металла на стенках носика начинают выдавливаться вверх. Данный режим сопровождается интенсивным тепловыделением с мощностью от 4 до 15 кВт в начальный момент времени.

Анализ данных режимов также интересен с точки зрения потенциальной возможности обеспечения временной остановки литья без применения дополнительных механических узлов или полной остановки комплекса. Однако по-прежнему остается опасность пролива металла по оси симметрии магнитного поля, где величина объемных сил всегда равна нулю. В этом случае удержание центральной точки осуществляется только за счет действия сил поверхностного натяжения.

Данные режимы являются критическими точками работы системы, однако регулирование величины тока в ограниченном интервале позволяет осуществить плавное изменение диаметра слитка и условий кристаллизации «на ходу», что является также важной особенностью технологии.

Заключение

1. Выяснено что «мягкий» старт литья является более предпочтительным, «грубый» старт приводит к небольшим проливам расплава и образованию крупных, часто асимметричных наплывов, что создает риск деформации слитка в верхней, нефиксированной части.

2. Выявлена ключевая роль КТО: Доказана необходимость использования сложной температурно-зависимой модели коэффициента теплоотдачи (КТО) вместо фиксированных значений. Фиксированный повышенный КТО может давать ложную картину стабильности,

маскируя риск пролива при движении слитка, в то время как функциональная зависимость адекватно отражает формирование естественных зон охлаждения.

3. Установлено, что для исследованного диапазона диаметров (25–33 мм) при стабильном литье фронт кристаллизации формируется практически плоским для большинства параметров. Ширина интервала кристаллизации ($\Delta T_B = 20\text{--}100\text{ }^\circ\text{C}$) незначительно влияет на стабильность, но снижает интенсивность вторичного вихря и температурные градиенты.

4. Изучены механизмы развития аварийных режимов.

Моделирование подтвердило стремительное развитие пролива ($< 1\text{ с}$) при резком сбросе тока, с расходом до 0.877 кг/с . Динамика универсальна для различных причин срыва.

Показана возможность управляемого сильного обжатия расплава увеличенным током (МДС 5000–8000 А) с формированием мениска или тонкого цилиндра жидкой фазы. Это открывает перспективы для временной остановки литья без механических узлов, но требует решения проблемы удержания центральной оси.

Список литературы / References

[1] Гецелев З. Н. *Непрерывное литье в электромагнитный кристаллизатор* М.: Металлургия, 1983. 152 с. [Getselev, Z. N. *Continuous Casting into an Electromagnetic Mold* M.: Metallurgiya, 1983. 152 p. (in Russian)]

[2] ElmaCast™ – технология литья алюминиевых сплавов в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://elmacast.com/> – Заглавие с экрана. [ElmaCast™ – Casting Technology of Aluminum Alloys in an Electromagnetic Crystallizer (EMC) [Electronic resource] – Access: <https://elmacast.com/>].

[3] Timofeev V., Pervukhin M., Vinter E., Sergeev N. Behavior of non-conducting particles in molten aluminium cast into electromagnetic molds, *Magnetohydrodynamics*, 2020, 56 (4), 459–472.

[4] Khatsayuk M., Vinter E., Timofeev V., Belov N., Sergeev N., Pervukhin M. Numerical simulation of process of electromagnetic casting and technology features, *Metall. Mater. Trans. B*, 2023, 54 (4), 1768–1783.

[5] Тимофеев В. Н., Усынина Г. П., Мотков М. М., Гудков И. С. Изготовление заклепочной проволоки из заготовки, полученной из сплава В65 методом электромагнитной кристаллизации, *Цветные металлы*, 2019, (3), 76–82 [Timofeev V. N., Usynina G. P., Motkov M. M., Gudkov I. S. Production of rivet wire from a billet made of B 65 alloy by electromagnetic crystallization, *Tsvetnye Metally*, 2019, (3), 76–82 (in Russian)]

[6] Белов Н. А., Черкасов С. О., Короткова Н. О., Мотков М. М. Влияние деформационно-термической обработки на структуру, электросопротивление и твердость сплава Al-4 %Cu-3 %Mn, полученного методом литья в электромагнитный кристаллизатор, *Физика металлов и металловедение*, 2024, 125(2), 221–228 [Belov N. A., Cherkasov S. O., Korotkova N. O., Motkov M. M. Effect of Thermomechanical Treatment on the Structure, Electrical Resistivity and Hardness of Al-4 %Cu-3 %Mn Alloy Produced by Electromagnetic Casting, *Physics of Metals and Metallography*, 2024, 125(2), 221–228 (in Russian)]

[7] Rogachev S. O., Motkov M. M., Andreev V. A., Gorshenkov M. V., Bondareva S. A., Stepashkin A. A., Naumova E. A. Effect of rotary swaging on the structure and properties of hypereutectic aluminum–calcium-based alloy, *Russ. Metall.*, 2025, (4), 856–862.

[8] Сидельников С. Б., Ворошилов Д. С., Первухин М. В., Мотков М. М. Разработка и исследование технологии получения проволоки из сплава Al–РЗМ с применением совмещенной обработки, *Цветные металлы*, 2019, (9), 63–68 [Sidelnikov S. B., Voroshilov D. S., Pervukhin M. V., Motkov M. M. Development and research of technology for producing wire from Al-REE alloy using combined processing, *Tsvetnye Metally*, 2019, (9), 63–68 (in Russian)]

[9] Лосев Г., Ельищев В. Индукционный метод локализации фронта кристаллизации, *Вестник Пермского университета. Физика*, 2023, (2), 57–61 [Losev G., Yel'tishchev V. Induction method for localization of the solidification front, *Bulletin of Perm University. Physics*, 2023, (2), 57–61 (in Russian)]

[10] Oborin P., Kolesnichenko I. Application of the ultrasonic doppler velocimeter to study the flow and solidification processes in an electrically conducting fluid, *Magnetohydrodynamics*, 2013, 49(1), 231–236.

[11] Spitans S. Numerical Modelling of Free Surface Dynamics of Melt in an Alternate Electromagnetic Field. Part II. Conventional electromagnetic levitation. *Metallurgical and Materials Transactions B.*– 2015.– № 1. – P. 522–536.

[12] Vencels J. EOF Library: Open-Source Elmer and OpenFOAM Coupler for Simulation of MHD With Free Surface. *Proceedings of XVIII International UIE – Congress Electrotechnologies for Material Processing.*– 2017.

[13] Geza V. *Investigation of stratified electromagnetically driven flows in electrically conducting fluids*: Ph. D. Thesis / V. Geza. – Riga, 2015.– 116 p.

[14] Minakov A. V. Mathematical model and numerical simulation of aluminum casting and solidification in magnetic fields with allowance for free surface dynamics. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2015, 55.

[15] Sabau A., Heat transfer boundary conditions for the numerical simulation of the DC casting process. Conference: *Light Metals 2004 – Proceedings of the Technical Sessions, 133rd Technical TMS Annual Meeting*, 2004. P. 667–672.

EDN: FUNUWM

УДК 654.935

Development of an Autonomous Employee Notification System Using LoRa Technology

**Aleksey S. Drobiazko^{*a},
Semyon A. Ryzhakov^b and Victor S. Ratushnyak^c**

^aSiberian Federal University

Krasnoyarsk, Russian Federation

^bKrasnoyarsk-Vostochny Station

JSC «Russian Railways»

Krasnoyarsk, Russian Federation

^cKrasnoyarsk Rail Transport Institute

a branch of Irkutsk State Transport University

Krasnoyarsk, Russian Federation

Received 09.11.2025, received in revised form 31.03.2026, accepted 19.05.2026

Abstract. The article discusses the development of an autonomous warning system for workers in a high-risk area near railway tracks. The relevance of the project is due to the high degree of risk in the production of track work, as well as the low reliability of existing warning devices, such as the SOP01 system and the use of signalers. According to official statistics, in 2024 alone, dozens of injuries were recorded among employees working near railway tracks, including fatal and group incidents. Existing solutions do not provide an adequate level of protection: alarm systems are susceptible to human error, and the SNR system is unreliable and often in a faulty state. The proposed system uses LoRa technology for alarm transmission and the Arduino microcontroller platform for data processing. The electromagnetic sensor SHMP12, which operates on the basis of the phenomenon of magnetic induction, is used as a rolling stock detection sensor. The system is implemented in two versions – mobile (transmitters in cases, receivers in vests) and stationary (installation of the transmitter in a travel cabinet, powered by a solar panel with a biaxial tracking system). A mock-up was developed, and the first field tests were carried out on railway tracks, which confirmed the stable operation and reliability of the device. The software part is executed in the Arduino IDE environment using the C/C++ language. The development meets modern occupational safety requirements, has a high degree of autonomy and noise immunity, is easily scaled and can serve as a replacement for outdated alarm systems. The system is ready for further improvement and implementation at Russian Railways facilities.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: alekseymdrobyazko2002@mail.ru

Keywords: employee notification system, LoRa technology, autonomy, safety, electromagnetic sensor, solar tracking system, wireless communication.

Citation: Drobiazko A. S., Ryzhakov S. A., Ratushnyak V. S. Development of an Autonomous Employee Notification System Using LoRa Technology. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(5), 642–652. EDN: FUNUWM



Разработка автономной системы оповещения работников с применением технологии LoRa

А. С. Дробязко^а, С. А. Рыжаков^б, В. С. Ратушняк^в

^аСибирский федеральный университет

Российская Федерация, Красноярск

^бСтанция Красноярск-Восточный

ОАО «Российские железные дороги»

Российская Федерация, Красноярск

^вКрасноярский институт железнодорожного транспорта –
филиал Иркутского государственного университета путей сообщения

Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. В статье рассматривается разработка автономной системы оповещения работников, находящихся в зоне повышенной опасности – вблизи железнодорожных путей. Актуальность проекта обусловлена высокой степенью риска при производстве путевых работ, а также низкой надежностью действующих средств предупреждения, таких как система СОП01 и использование сигнальщиков. Согласно официальной статистике, только за 2024 год зафиксированы десятки случаев травматизма среди сотрудников, работающих вблизи железнодорожных путей, включая смертельные и групповые инциденты. Существующие решения не обеспечивают должного уровня защиты: сигналисты подвержены человеческому фактору, а система СОП01 ненадежна и часто находится в неисправном состоянии. Предлагаемая система использует технологию LoRa для передачи сигнала тревоги и микроконтроллерную платформу Arduino для обработки данных. В качестве датчика обнаружения подвижного состава использован электромагнитный датчик ШМПИ2, функционирующий на основе явления магнитной индукции. Система реализована в двух вариантах – мобильном (передатчики в кейсах, приемники в жилетах) и стационарном (монтаж передатчика в путевом шкафу, питание осуществляется от солнечной панели с системой двухосного трекинга). Разработан макет, проведены первые полевые испытания на железнодорожных путях, подтвердившие стабильную работу и надежность устройства. Программная часть выполнена в среде Arduino IDE с использованием языка C/C++. Разработка соответствует современным требованиям по охране труда, обладает высокой степенью автономности и помехозащищенности, легко масштабируется и может служить заменой устаревшим средствам сигнализации. Система готова к дальнейшему совершенствованию и внедрению на объектах ОАО «РЖД».

Ключевые слова: система оповещения работников, технология LoRa, автономность, безопасность, электромагнитный датчик, система слежения за солнцем, беспроводная связь.

Цитирование: Дробязко А. С. Разработка автономной системы оповещения работников с применением технологии LoRa / А. С. Дробязко, С. А. Рыжаков, В. С. Ратушняк // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(5). С. 642–652. EDN: FUNUWM

Введение

Обеспечение безопасности труда на объектах железнодорожной инфраструктуры – одна из приоритетных задач, стоящих перед ОАО «РЖД» как работодателем и оператором крупнейшей транспортной системы страны. Безопасные условия работы персонала напрямую влияют не только на здоровье и жизнь работников, но и на бесперебойность и качество перевозочного процесса в целом. Учитывая, что обслуживание инфраструктуры и технических устройств ложится на плечи персонала служб железной дороги, крайне важно обеспечить их защиту в ходе выполнения работ, особенно вблизи железнодорожных путей – зоне повышенной опасности [1].

Согласно распоряжению ОАО «РЖД» от 18 июня 2024 года № 1459/р, сигналисты должны располагаться на расстоянии зрительного контакта с рабочей бригадой и обеспечивать обнаружение приближающегося поезда минимум за 500 метров (а на участках, где идут работы, – за 800 метров). Тем не менее даже при соблюдении этих требований сохраняется риск того, что сигнал не будет принят вовремя или будет проигнорирован в условиях высокой рабочей нагрузки и внешних помех [2].

Актуальность

Существующая практика предупреждения рабочих бригад о приближении подвижных составов включает использование специальных сотрудников – сигналистов, а также технических решений, таких как система СОП01 (система оповещения работников). Однако, несмотря на их широкое распространение, эти способы не обеспечивают необходимый уровень безопасности и надежности. Так, согласно актуальным данным, в 2024 году на производстве было зафиксировано более 20000 случаев травматизма среди работников, из которых около 1700 – со смертельным исходом. В частности, в подразделениях ЦДИ (Центральная Дирекция инфраструктуры) и ЦДРП (Центральная Дирекция по ремонту пути) произошло свыше 40 случаев травматизма, 11 из которых закончились гибелью, а 7 стали групповыми инцидентами. Одной из ключевых причин таких происшествий является человеческий фактор: снижение бдительности, усталость, ограниченная видимость, высокий уровень шума в месте проведения работ и погодные условия (туман, метель). Сигналисты, находясь на значительном удалении от рабочих (минимум 500 метров), могут несвоевременно отреагировать на приближение подвижного состава или быть попросту не услышанными бригадой [3].

В то же время существующее техническое решение в виде системы СОП01 не обеспечивает должный уровень надежности. Система имеет ряд существенных недостатков, затрудняющих ее полноценную эксплуатацию: высокий процент отказов, конструктивные недоработки, отсутствие унифицированных регламентов по техническому обслуживанию и ремонту оборудования.

Разработка системы

В условиях стремления к цифровизации и автоматизации процессов существующие методы нуждаются в серьезной модернизации. Одним из перспективных направлений является использование технологий беспроводной связи, в частности LoRa (Long Range Radio), обеспечивающей надежную передачу данных на значительные расстояния при низком энергопотреблении. В этом контексте предлагается использование новой автономной системы оповещения работников о приближении подвижного состава, которая основана на применении

микроконтроллерных технологий (в связке с электромагнитным датчиком обнаружения поезда) и радиоканале на базе LoRa-модулей. Предлагаемая система может быть использована как основное или дополнительное средство (как инструмент сигналиста) оповещения работников о приближающемся составе [4, 5].

Ключевым преимуществом предлагаемого решения является возможность оперативного и автоматизированного оповещения работников о приближении подвижной единицы с целью немедленного прекращения работ и схода в безопасную зону. Это позволяет существенно снизить вероятность несчастных случаев, вызванных человеческим фактором, низкой видимостью или запоздалым предупреждением со стороны сигналистов.

Технически данная система будет состоять из 2 передатчиков и 3 приемников. Передатчик будет оснащен микропроцессорной платой Arduino Mega, датчиком обнаружения поезда, модулем беспроводной связи LoRa, источником питания и, в зависимости от варианта применения, солнечной батареей. Приемник, в свою очередь, встроен в сигнальный жилет работника и состоит из микропроцессорной платы Arduino Micro, модуля беспроводной связи LoRa, модуля реле Arduino, звуковой и световой сигнализации и источника питания [5, 6].

Программирование микроконтроллеров, как на передающих, так и на приемных устройствах, осуществлялось в среде разработки Arduino IDE с использованием упрощенного языка программирования C/C++. В рамках программной реализации были разработаны отдельные скетчи для обработки сигнала от датчика ШМП12, передачи данных по радиоканалу LoRa, а также для активации световой и звуковой сигнализации на приемной стороне. Программный код был оптимизирован с учетом необходимости работы в условиях ограниченных вычислительных ресурсов и обеспечения стабильной бесперебойной связи между модулями [6].

Проектируемая система реализуется в двух вариантах: стационарном и мобильном, в зависимости от характера объекта и условий эксплуатации:

- стационарный вариант предназначен для объектов железнодорожной инфраструктуры, требующих постоянного обслуживания и расположенных вблизи путей, например, посты КТСМ (комплекс технических средств многофункциональный). В данном случае передающая часть системы размещается в специальном путевом шкафу, оборудованном автономным электропитанием, за счет использования солнечной панели с функцией отслеживания источника энергии (солнце) в двух плоскостях (трекинг). Приемные устройства интегрированы в сигнальные жилеты сотрудников;

- мобильный вариант ориентирован на временные и разовые работы на путях. В этом случае передатчики размещаются в защитных кейсах и перед началом работ устанавливаются вручную за 1 км по обе стороны от места проведения работ. Приемники по-прежнему встроены в сигнальные жилеты рабочих.

В качестве датчика обнаружения поезда планируется использование электромагнитного датчика ШМП12, состоящего из головки и крепежного устройства. ШМП12 функционирует на основе явления магнитной индукции. Когда гребень колеса приближается к датчику, магнитный поток возрастает, что вызывает появление в катушке ЭДС в форме колоколообразного импульса. При удалении гребня из зоны чувствительности магнитное поле уменьшается и в катушке возникает ЭДС с противоположной полярностью. Сформированный сигнал регистрируется микроконтроллером, входящим в состав передающей части системы [7, 8].

Выбор ШМП12 обусловлен его высокой надежностью, высокой помехозащищенностью, простотой установки и эксплуатации, а также способностью эффективно функционировать в различных климатических условиях. Его технические характеристики соответствуют требованиям, предъявляемым к системам безопасности на железнодорожном транспорте.

Для оповещения работников предусмотрено 2 вида сигнализации:

1. Световая сигнализация: исполнена в виде красной светодиодной ленты, размещенной на внешней стороне сигнального жилета работника.

Световая сигнализация является одним из основных средств предупреждения о потенциальной опасности, к преимуществам данного вида сигнализации можно отнести:

- заметность в различных условиях;
- наглядность получаемой информации;
- эффективность при высоких уровнях шума.

2. Звуковая сигнализация: в данной системе служит дополнительным средством оповещения работников, издавая громкое и раздражительное пищание. Источник звука находится внутри корпуса вместе с исполнительной частью приемника. В качестве источника звука используется зуммер пьезоэлектрический, имеющий миниатюрные размеры и достаточно громкий звук.

Питание и автономность системы

Для обеспечения автономного питания передающего модуля (в случае стационарного варианта размещения системы), находящегося в путевом шкафу, предлагается использование солнечной системы с функцией двухосного слежения за солнцем. Использование солнечной энергии позволяет поддерживать работоспособность устройства, обеспечивая бесперебойную работу системы в удаленных или труднодоступных местах с отсутствием электроснабжения. Энергия, полученная с помощью солнечной панели через контроллер заряда, будет накапливаться в аккумуляторной батарее.

Эксплуатация солнечной панели планируется с применением системы слежения за солнцем, что позволяет значительно повысить ее эффективность за счет увеличения коэффициента полезного действия (КПД). В течение светового дня панель будет автоматически ориентироваться в сторону максимальной солнечной освещенности, что способствует более полной выработке энергии и стабильному восстановлению емкости аккумуляторной батареи. Применение трекингового механизма особенно актуально для регионов с переменными погодными условиями и низкой инсоляцией [9].

Поворот солнечной панели осуществляется с помощью простого аналогового устройства, не требующего микроконтроллера. Конструкция панели предусматривает установку на специальный кронштейн, обеспечивающий вращение в двух плоскостях – горизонтальной и вертикальной. На поверхности панели установлены четыре фоторезистора, размещенные по одному на каждой из сторон (слева, справа, сверху и снизу). Эти датчики воспринимают уровень освещенности (чем ярче свет, тем выше ток, проходящий через фоторезистор), и их сигналы сравниваются на специальной плате с усилителями. К плате также подключены два электродвигателя, каждый из которых отвечает за поворот панели в одной из двух плоскостей. При изменении положения Солнца один из фоторезисторов фиксирует больше света, чем противо-

положительный – на его выходе формируется положительный или отрицательный сигнал. Возникающая разность потенциалов приводит к срабатыванию двигателя, который начинает вращать панель в нужную сторону. Процесс продолжается до тех пор, пока освещенность на паре противоположных фоторезисторов не сравняется, и сигналы не «выйдут в ноль» – в этот момент поворот останавливается [9].

Принцип работы системы

Принцип работы заключается в постоянном «общении» модулей LoRa между собой и информировании друг друга об изменениях. Перед началом выполнения работ работники должны установить передатчики на расстоянии не менее 1–1,5 км от места работ в зависимости от рельефа местности и условий видимости, а также включить приемник и убедиться в работоспособности системы, только после этого приступить к работам. В процессе выполнения рабочих обязанностей при проезде состава над одним из датчиков обнаружения поезда формируется сигнал, который фиксируется контроллером и мгновенно передается через беспроводную связь LoRa на приемники, встроенные в сигнальные жилеты работников. При получении сигнала на жилетах загорается красная светодиодная лента, и раздается громкий звуковой сигнал, свидетельствующий о прекращении работ вблизи железнодорожных путей и необходимо-

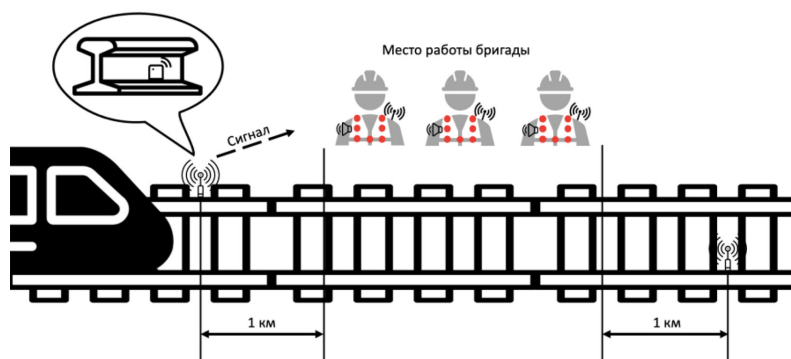


Рис. 1. Принцип работы системы оповещения рабочих бригад об опасности

Fig. 1. The principle of operation of the warning system for work crews about the danger

сти немедленно отойти на безопасное расстояние. После проезда подвижной единицы жилеты гаснут, что означает отсутствие состава на путях и возможность продолжения выполнения рабочих обязанностей [5]. Наглядный принцип работы представлен на рис. 1.

Создание макета системы

Для реализации и наглядной работы системы был разработан макет системы, состоящий из 2 передатчиков с электромагнитным датчиком обнаружения подвижного состава ШМП12, 3 приемников, солнечной панели с функцией трекинга, установленной на путевом шкафу, аккумуляторной батареи. Макет системы максимально приближен к будущему промышленному образцу и демонстрирует его основные функции.



Рис. 2. Сигнальный жилет работника, в который встроен приемник-контроллер

Fig. 2. The employee's signal vest, which has a built-in receiver-controller

Сигнальный жилет работника со встроенным приемником-контроллером представлен на рис. 2. Жилет оборудован световой и звуковой сигнализацией – в виде светодиодной ленты и пьезоэлектрического зуммера соответственно.

Солнечная панель с функцией слежения за источником света представлена на рис. 3 и 4.

Исполнительная часть контроллера-передатчика с подключенным к нему электромагнитным датчиком обнаружения состава ШМП12 представлена на рис. 5.

Передающее устройство, установленное в путевом ящике, оборудованном солнечной панелью с функцией двухосного трекинга, изображено на рис. 6.

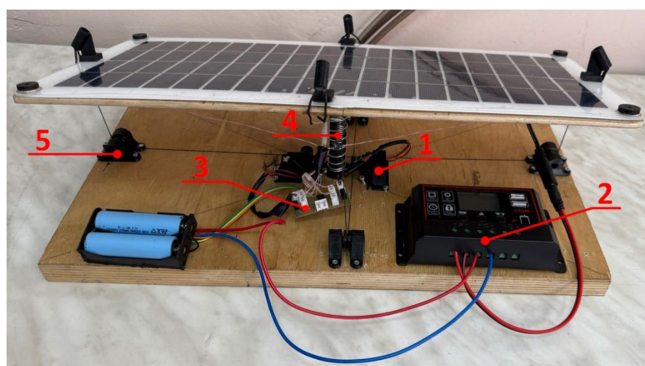


Рис. 3. Солнечная панель с функцией слежения за источником света, вид сбоку: 1 – электродвигатель постоянного тока, осуществляющий поворот панели; 2 – контроллер заряда, подключенный к АКБ и солнечной панели; 3 – плата управления механизмом слежения (усилитель рассогласования); 4 – центральная поворотная стойка с возвратной пружиной; 5 – направляющий блок с роликом натяжения тросового привода

Fig. 3. Solar panel with the function of tracking the light source, side view: 1 – DC electric motor that rotates the panel; 2 – charge controller connected to the battery and solar panel; 3 – control board for the tracking mechanism (misalignment amplifier); 4 – central rotary stand with a return spring; 5 – guide cable drive tension roller unit

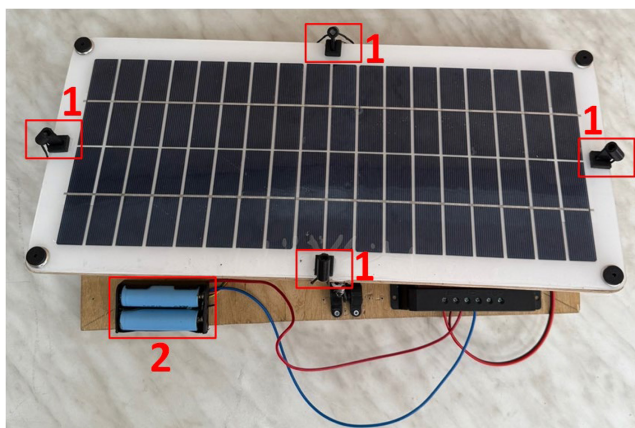


Рис. 4. Солнечная панель с функцией слежения за источником света, вид сверху: 1 – фоторезисторы, расположенные по краям солнечной батареи; 2 – аккумуляторная батарея, подключенная к контроллеру заряда

Fig. 4. Solar panel with the function of tracking the light source, top view: 1 – photoresistors located at the edges of the solar panel; 2 – rechargeable battery connected to the charge controller

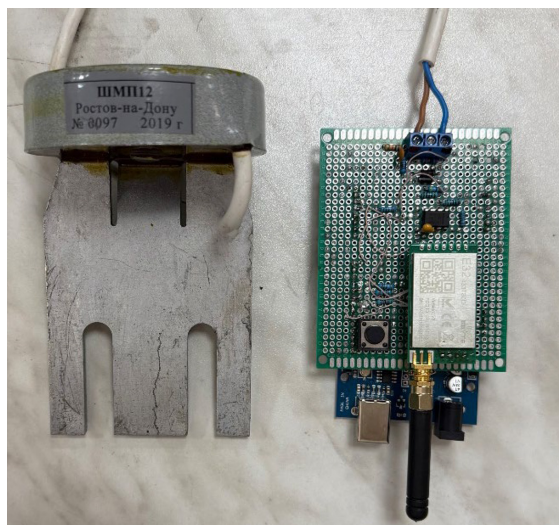


Рис. 5. Исполнительная часть передатчика

Fig. 5. The executive part of the transmitter

Испытания и результаты

Для подтверждения работоспособности системы были проведены первые полевые испытания на железнодорожных путях. В ходе тестирования оборудование было размещено в условиях, максимально приближенных к реальным. При прохождении подвижного состава датчик ШМП12 корректно зафиксировал приближение поезда, сигнал был успешно передан по радиоканалу LoRa на приемные устройства, встроенные в сигнальные жилеты работников. Система своевременно активировала световую и звуковую сигнализацию, тем самым подтверждая свою эффективность и устойчивость к внешним помехам. Испытания показали стабильную работу

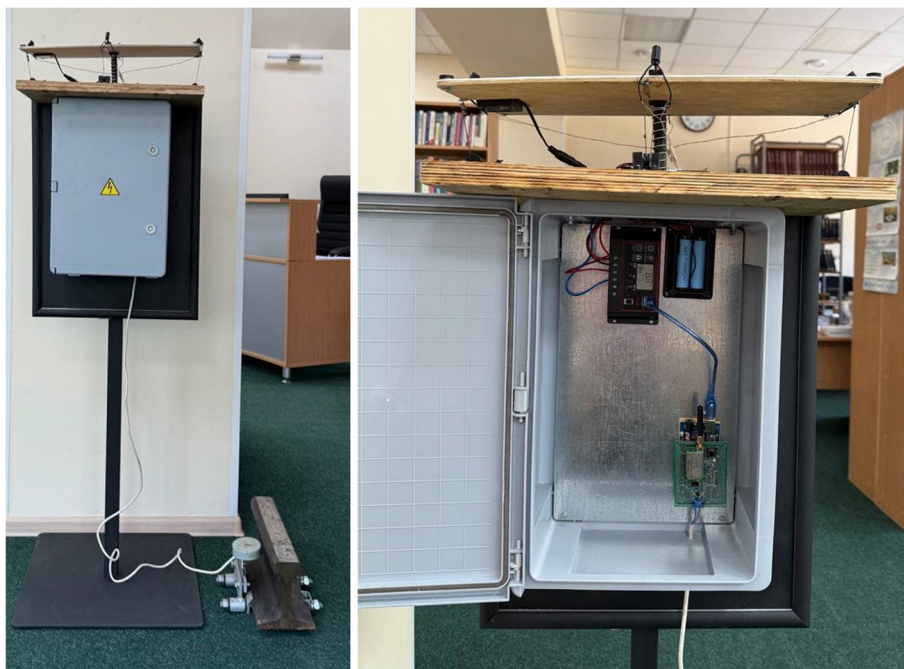


Рис. 6. Передающее устройство, установленное в путевом ящике, оборудованном солнечной панелью с трекингом: слева – общий вид передающей части с подключенным датчиком ШМП12; справа – оборудование, размещенное внутри ящика, и система слежения за солнцем, закрепленная на крыше ящика

Fig. 6. Transmitting device installed in a travel box equipped with a tracking solar panel: on the left is a general view of the transmitting part with a connected SHMP12 sensor; on the right is the equipment located inside the box and the sun tracking system mounted on the roof of the box

всех элементов устройства и подтвердили его готовность к дальнейшему усовершенствованию и внедрению в производственные условия.

Заключение

В ходе выполнения работы была разработана и реализована автономная система оповещения работников о приближении подвижного состава с использованием технологии беспроводной связи LoRa и микроконтроллерных компонентов. Предложенное техническое решение ориентировано на повышение уровня безопасности при выполнении работ вблизи железнодорожных путей, что соответствует актуальным требованиям к охране труда на предприятиях с повышенным уровнем опасности, в том числе в ОАО «РЖД».

Разработанная система способна эффективно заменить устаревшие и ненадежные методы оповещения, включая человеческий фактор в лице сигнальщиков и низкоэффективную систему СОП01. Она обеспечивает своевременное и достоверное предупреждение рабочих бригад, что позволяет минимизировать риски травматизма и повышает общую безопасность производственного процесса.

Система отвечает современным требованиям к надежности, автономности и адаптивности. Использование солнечного питания с функцией слежения за солнцем гарантирует ее

бесперебойную работу даже в удаленных и труднодоступных регионах с неблагоприятными климатическими условиями. Применение микроконтроллеров и радиомодулей LoRa позволяет создавать масштабируемые и гибкие конфигурации, легко адаптируемые под конкретные условия эксплуатации.

Первичные испытания устройства, проведенные в реальных условиях на железнодорожных путях, подтвердили его работоспособность и корректную реакцию системы на приближающийся поезд. Это свидетельствует о практической реализуемости проекта и возможности его внедрения в производственную среду.

Система имеет значительный потенциал для дальнейшего совершенствования: возможно расширение функционала, повышение энергоэффективности, реализация централизованного мониторинга состояния оборудования, интеграция с другими системами безопасности и автоматизации. Таким образом, предложенное решение не только соответствует современным стандартам, но и является перспективным направлением в развитии цифровой инфраструктуры безопасности на железнодорожном транспорте.

Список литературы / References

[1] Правительство РФ «О Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» от 27.11.2021 №№ 3363-р // rzd.ru. 2024. [The Government of the Russian Federation “On the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035” dated 11/27/2021 №№ 3363-r // rzd.ru. 2024.]

[2] Распоряжение ОАО «РЖД» «О внесении изменений в Правила по безопасному нахождению работников ОАО «РЖД» на железнодорожных путях, утвержденные распоряжением ОАО «РЖД» от 24 декабря 2012 года N 2665р» от 18.06.2024 № N 1459/р // ГАРАНТ. 2024. [Order of JSC “Russian Railways” “On amendments to the Rules for the safe stay of employees of JSC “Russian Railways” on railway tracks, approved by the Order of JSC Russian Railways dated December 24, 2012 No. 2665r dated 06/18/2024 No. 1459/r // GARANT. 2024.]

[3] Распоряжение ОАО «РЖД» «Об утверждении правил по безопасному нахождению работников ОАО «РЖД» на железнодорожных путях» от 24.12.2012 № N 2665р // Официальный интернет-портал правовой информации. 2017. [Order of JSC Russian Railways “On approval of the Rules for the safe stay of employees of JSC Russian Railways on railway tracks” dated December 24, 2012 No. 2665p // Official Internet portal of legal Information. 2017.]

[4] Копылов О. Д., Семенов Н. А. Система контроля состояния сигнальной установки числовой кодовой автоблокировки с использованием радиоканала на базе модуля LoRa, *Молодежная наука: труды XXVIII Всероссийской студенческой научно-практической конференции КРИЖТ ИрГУПС*. Красноярск: КРИЖТ ИрГУПС, 2024, 1, 31–35. [Kopylov O. D., Semenov N. A. A system for monitoring the status of a numerical code auto-locking alarm system using a radio channel based on the Lora module, *Youth Science: proceedings of the XXVIII All-Russian Student Scientific and practical conference of the KRIZHT IrGUPS*, Krasnoyarsk: KRIZHT IrGUPS, 2024, 1, 31–35 (in Russian)]

[5] Рыжаков С. А., Дробязко А. С. Разработка системы оповещения рабочих бригад об опасности, *Молодежная наука: труды XXVIII Всероссийской студенческой научно-практической конференции КРИЖТ ИрГУПС*, Красноярск: КРИЖТ ИрГУПС, 2024, 1, 16–21. [Ryzhakov S. A.,

Drobiazko A. S. Development of a warning system for work crews about danger, *Youth science: proceedings of the XXVIII All-Russian student scientific and practical conference KRIZHT IrGUPS*, Krasnoyarsk: KRIZHT IrGUPS, 2024, 1, 16–21 (in Russian)]

[6] Ратушняк В. С., Гаранин А. Е., Товстенко Д. С. Разработка макета изучения алгоритмов функционирования напольных устройств железнодорожной автоматики на микроконтроллере Arduino, *Инновационные технологии на железнодорожном транспорте: Труды XXV Всероссийской научно-практической конференции КрИЖТ ИрГУПС*, Красноярск: КрИЖТ ИрГУПС, 2021, 1, 71–74. [Ratushnyak V. S., Garanin A. E., Tovstenko D. S. Development of a layout for studying algorithms for the functioning of floor-mounted railway automation devices on an Arduino microcontroller, *Innovative technologies in railway transport: Proceedings of the XXV All-Russian Scientific and Practical Conference KRIZHT IrGUPS*, Krasnoyarsk: KRIZHT IrGUPS, 2021, 1, 71–74 (in Russian)]

[7] Кукушкина Н. С., Алексеенко В. А. Особенности применения датчиков прохода колес в системах контроля параметров подвижного состава. *Молодая наука Сибири*, 2023, 1(19), 79–89. [Kukushkina N. S., Alekseenko V. A. Features of the use of wheel passage sensors in rolling stock parameter monitoring systems. *Young Science of Siberia*, 2023, 1(19), 79–89 (in Russian)]

[8] Штанке В. В. Анализ сигналов работы магнитоиндукционного датчика при проходе колесной пары подвижного состава, *Транспорт: наука, образование, производство: материалы Международной научно-практической конференции*, Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2024, 134–138. [Shtanke V. V. Analysis of the signals of the magnetoinduction sensor during the passage of a rolling stock wheelset, *Transport: science, education, production: proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, Rostov-on-Don: Rostov State University of Communications, 2024, 134–138 (in Russian)]

[9] Антонов Ю. М. Датчик слежения за солнцем двухосной системы ориентации солнечных батарей, *Сантехника, Отопление, Кондиционирование*, 2015, 9(165), 90–91. [Antonov Yu. M. Sun tracking sensor of a biaxial orientation system of solar panels, *Plumbing, Heating, Air conditioning*, 2015, 9(165), 90–91 (in Russian)]

EDN: DBKJIR

УДК 681.2.083

The Results of Analytical, Model and Experimental Studies of the Use of Multistatics and the Luminal Method

Pavel A. Starodubtsev^a,
Igor M. Margulis^a and Grigory V. Dorofeev^{b*}

^aTGA LLC

Moscow, Russian Federation

^b*Pacific Higher Naval College named after S. O. Makarov*

Vladivostok, Russian Federation

Received 11.12.2025, received in revised form 31.03.2026, accepted 19.05.2026

Abstract. Monitoring the underwater situation is still one of their urgent tasks both in the interests of national defense and in the interests of the national economy in order to effectively use marine resources. In this article, the authors present the results of analytical, model and experimental studies of the use of metastatic and the luminal method as the most promising classes of spatial structures of underwater surveillance systems. Multistate circuits have their advantages and disadvantages, but their advantage is in detecting small objects at different distances. The development of sonar equipment and improved signal processing methods make it possible to expand the information content of spatial structure data, thereby improving the accuracy of detection and classification of small objects in marine economically important areas of our state.

Keywords: militaristically circuits, sonar stations, lumen method, spectral components, lumen station, lumen signal.

Citation: Starodubtsev P. A., Margulis I. M., Dorofeev G. V. The Results of Analytical, Model and Experimental Studies of the Use of Multistatics and the Luminal Method. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(5), 653–665. EDN: DBKJIR



Результаты аналитических, модельных и экспериментальных исследований использования мультистатистики и просветного метода

П. А. Стародубцев^а, И. М. Маргулис^а, Г. В. Дорофеев^б

^аООО «ТГА»

Российская Федерация, Москва

^б*Тихоокеанское высшее военно-морское училище им. С. О. Макарова*

Российская Федерация, Владивосток

Аннотация. Наблюдение за подводной обстановкой до сих пор является одной из актуальных задач как в интересах обороны страны, так и в интересах народного хозяйства с целью эффективного применения морских ресурсов. В данной статье авторы приводят результаты аналитических, модельных и экспериментальных исследований использования мультистатистики и просветного метода как наиболее перспективных классов пространственных структур систем подводного наблюдения. Мультистатистические схемы имеют свои достоинства и недостатки, но их преимущество в обнаружении малоразмерных объектов на разном удалении. Развитие гидроакустического оборудования, совершенствование методов обработки сигналов позволяют расширить информативность данных пространственных структур, тем самым повысить точность обнаружения и классификации малоразмерных объектов в морских экономически важных зонах нашего государства.

Ключевые слова: мультистатистические схемы, гидролокационные станции, просветный метод, спектральные компоненты, просветный стационар, просветный сигнал.

Цитирование: Стародубцев П. А. Результаты аналитических, модельных и экспериментальных исследований использования мультистатистики и просветного метода / П. А. Стародубцев, И. М. Маргулис, Г. В. Дорофеев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(5). С. 653–665. EDN: DBKJIR

Как показал проведенный авторами статьи анализ [1], в современной гидроакустике одним из наиболее перспективных классов пространственной структуры систем подводного наблюдения являются мультистатистические схемы (МС), представляющие собой разнесенные по акватории гидролокационные станции (ГЛС) активного и пассивного режимов работы с пересекающимися зонами обзора. Подклассом таких систем являются и МС для обнаружения малоразмерных объектов [1].

Применение метода адаптивной режекции и расчет функции максимального правдоподобия в МС позволяют провести идентификацию данных об объекте и соотнести полученный эхо-сигнал номеру ГЛС, его сформировавшей, с определением настоящего места объекта и направления на него (П-пеленг или КУ-курсовой угол).

Как видно из [1]:

- положительным при реализации МС является идентификация с определением настоящего места объекта и направления на него;
- отрицательным – отсутствие возможности проведения процесса распознавания (классификации) объектов, необходимость наличия в МС системы навигационной ориентации в пространстве, проведение масштабных расчетов при реализации метода адаптивной режекции и функции максимального правдоподобия.

Как показал проведенный анализ процесса формирования пространственной структуры стационарных, позиционных, мобильных систем подводного наблюдения, в основном он направлен на повышение точности проводимых измерений, их информативности, простоты математической реализации и конструктивного устройства [1].

Все это позволяет выделить МС как приоритетное направление, которое совершенствуется за счет расширения частотного диапазона, перехода функционирования на шумоподобные сигналы, отстройку от реверберационной помехи и внедрения активно-пассивных многопозиционных систем.

Просветным методом (ПМ) в гидроакустике считают метод мониторинга полей физических явлений и объектов, основанный на закономерностях нелинейного взаимодействия акустических просветных волн с информационными волнами различной физической природы.

Реализация просветного метода с расчетом «функции спектра разности фаз принятых просветных сигналов» (д.т.н. Мироненко М. В., 1972 г.) или «функции разности фаз спектра просветных сигналов» (д.т.н. Стародубцев П. А., 2005 г.) позволяет провести распознавание (классификацию) объектов и мониторинг водной среды в широком диапазоне частот.

Самая простая МС состоит из 1 мощного излучателя и 2 горизонтально разнесенных приемников. В этом случае элементы позиционирования не являются главными, и приоритетность переходит к процессам распознавания и мониторинга водной среды, а точнее, к реализации теории ПМ. В противном случае, когда «много приемников и излучателей», процедура их позиционирования и идентификации объектов становится определяющей (МС) [2].

Как видно из данных рассуждений, положительным для просветного метода является:

- возможность проведения распознавания (классификации) обнаруженных по спектру разности фаз объектов;
- отсутствие необходимости наличия системы навигационной ориентации в пространстве и проведения масштабных расчетов «функции спектра разности фаз принятых просветных сигналов» или «функции разности фаз спектра просветных сигналов»;
- отрицательным при реализации просветного метода является отсутствие идентификации с определением только области возможного положения объекта и без направления на него.

Однако многолетние исследования выявили ряд принципиальных трудностей фундаментального и технического характера при обработке сигналов, присущих мультистатистическому режиму работы гидроакустических средств.

В основном эти трудности связаны с тем, что исчерпывающая информация для проведения идентификации, получается только при многоракурсном облучении исследуемой акватории.

Вследствие этого чрезвычайно трудоемкого и высокой стоимости процесса, несмотря на очевидную научную, прикладную и экономическую ценность МС, его использование не вышло за рамки отдельных экспериментов и не получило необходимого развития.

Это потребовало новых исследований модельного характера процессов обработки сигналов, их идентификации в МС и распознавания в ПМ на базе «синхронизации спектральных компонент (СК) (в МС) и расчета спектра их разности фаз (в ПМ)» [2].

Дополнительно был разработан совместный алгоритм, объединяющий этапы реализации МС и ПМ при обработке сигналов, построения системы, идентификации объектов, распознавания объектов и мониторинга морской среды (рис. 1) [2, 3].

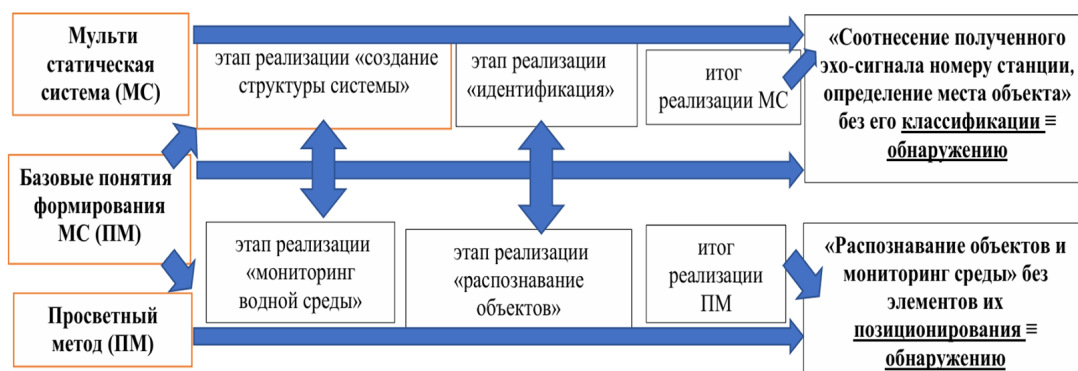


Рис. 1. Совместный алгоритм, объединяющий этапы реализации МС и ПМ

Fig. 1. A joint algorithm that combines the implementation stages of MC and PM

Исторически [4, 5] прототип МС на акватории Дальневосточных морей был реализован на основе просветного стационара (ПрС) «остров Сахалин – остров Итуруп» (Охотское море) (1972 г.) и функционировал достаточно долгое время, решая народно-хозяйственные задачи и оборонные проблемы (рис. 2).

На базе данного ПрС, проведя дополнительные конструктивные изменения, технологически и технически возможно реализовать один из вариантов МС, а именно активно-пассивную МС [3, 4], пространственно состоящую из одного мощного стационарного (И) и двух горизонтально-разнесенных (Пр), добавив операционно-вычислительный центр, находящийся в месте установки пассивных приемников, где конечным параметром его работы будет синхронизация СК

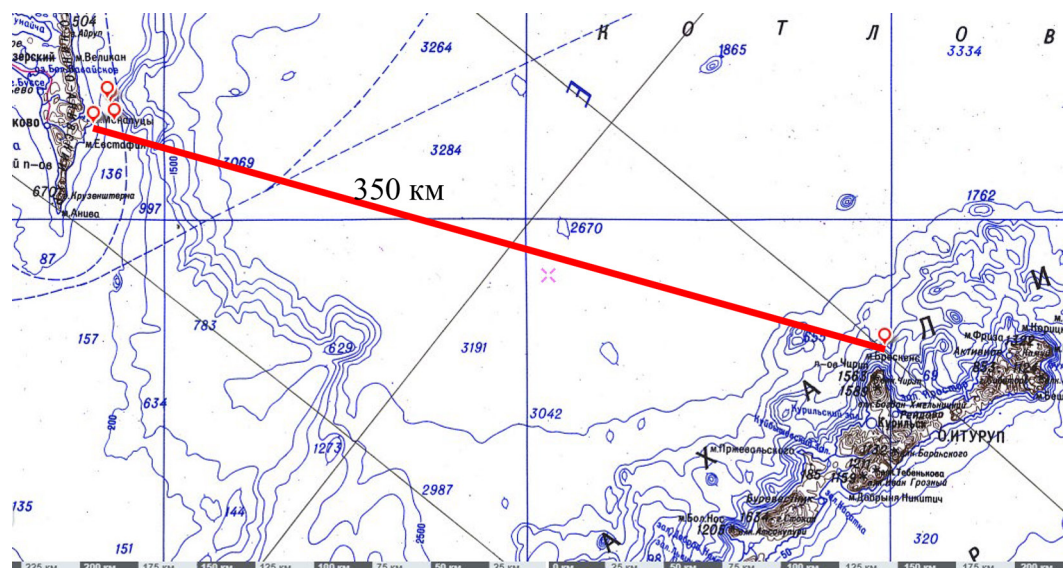


Рис. 2. Гидроакустическая трасса о. Итуруп – о. Сахалин, длиной 350 км

Fig. 2. Hydroacoustic route from Iturup to Sakhalin, 350 km long

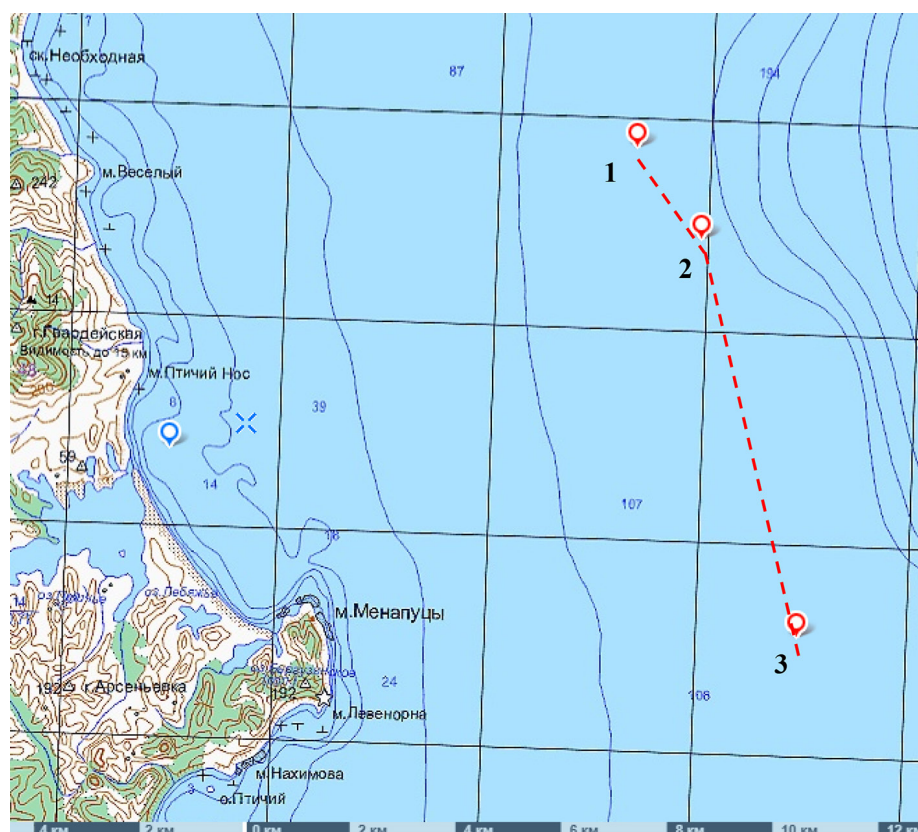


Рис. 3. Просветный стационар «остров Сахалин – остров Итуруп» (1, 2 и 3 – гидроакустические приемники)

Fig. 3. The Sakhalin-Iturup lighthouse (1, 2, and 3 are hydroacoustic receivers)

просветных сигналов (ПС) (для МС и ее позиционирования), расчет разности фаз СК ($\Delta\varphi$) (или спектра разности фаз) для ПМ и распознавания объектов и физических явлений (рис. 3).

Несмотря на простоту предложенного решения, все его элементы рассмотреть одновременно будет достаточно сложно, поэтому в данной научной статье будут представлены только аналитические выводы отношения «параметра связи» (ε) [6, 7] к некоторым видам синхронизации СК хаотических сигналов в МС и для проведения идентификации СК. В дальнейшем это может использоваться для построения МС и проведения распознавания всей структуры СК ПС.

В современной теории нелинейных колебаний процесс выбора «параметра связи» (ε) обосновывается следующим образом [8]. За (ε) берется функциональная зависимость, обратно пропорциональная произведению осредненного значения круговой частоты $\langle\omega\rangle$ «какого-то участка» спектра сигнала одного хаотического осциллятора, умноженная на временной сдвиг (τ) относительно осредненного значения круговой частоты $\langle\omega\rangle$ «такого в точности участка» второго хаотического осциллятора (или наоборот) (1).

$$\varepsilon \sim \langle\omega\rangle^{-1} \cdot \tau^{-1}. \quad (1)$$

Результаты численного анализа формулы (1) и [5–8] показаны на рис. 4, а именно: результаты расчета разности фаз $\Delta\varphi_f(2)$ СК от частоты (f), связь фазовой синхронизации с лаг-синхронизацией, зависимость лаг-синхронизации от τ (2).

$$\Delta\varphi_f = \varphi_{f1}(f) - \varphi_{f2}(f) = 2\pi \cdot \tau \cdot f, \quad (2)$$

где $\varphi_{f1}(f)$ – фаза первого осциллятора; $\varphi_{f2}(f)$ – фаза второго осциллятора; f – значение частоты, для которой рассчитывается фаза и разность фаз.

По результатам анализа графика на рисунке 4 можно отметить следующее (для идентификации сигнала в МС):

- достаточно просто проследить процесс перехода из режима фазовой синхронизации в режим лаг-синхронизации и наоборот, если знать функциональную зависимость изменения (τ);
- график режима лаг-синхронизации представляет собой прямую линию;
- угол наклона графика режима лаг-синхронизации определяется по формуле $K \approx 2\pi \cdot \tau$ и зависит от (τ);
- «широта» режима фазовой синхронизации относительно графика лаг-синхронизации также зависит от (τ) и проявляется в отклонениях от него;
- при $\uparrow \tau$ будет $\epsilon \downarrow$, что приведет к переходу из режима лаг-синхронизации в режим фазовой синхронизации (при больших значениях ϵ) или выходу из режима фазовой синхронизации и полной рассинхронизации СК хаотических осцилляторов (при малых значениях ϵ);
- чем меньше K , тем дольше будет выполняться режим фазовой синхронизации хаотических осцилляторов и позже наступать режим лаг-синхронизации;
- наиболее предпочтительным для работы системы в целом является вариант нахождения ее в режиме фазовой синхронизации, но практические системы (МС) в таком случае будет реализовать достаточно сложно по причине необходимости наличия малых погрешностей δf измерения частоты ПС;
- в случае быстрого перехода системы из режима фазовой синхронизации в режим лаг-синхронизации будет наблюдаться неустойчивость работы МС в целом (пространственное расположение И и Пр). Весь процесс циклической смены режимов синхронизации можно наглядно представить на рис. 5 [5–8].

В то же самое время для ряда систем (прежде всего так называемых систем с плохо определенной фазой [9, 10]) описание явления фазовой синхронизации хаотических осцилляторов с помощью фазы $\varphi(t)$ может приводить к некорректным результатам. В интерпретации решения научной задачи, поставленной в данной статье, такой некорректностью является отсутствие учета стабильности выработки частоты δf генераторами излучателей МС.

Имея это в виду, рассмотрим ситуацию, в которой будут учитываться условия формирования сигнала, процесс его распространения в морской среде, условия приема и не хаотичность всей системы в целом, а детерминированная хаотичность СК сигнала относительно заданного положения равновесия в конкретных ситуациях.

За положение равновесия возьмем $\langle \omega_{ck} \rangle$, за детерминированную хаотичность СК – δf , а за (ϵ) – функциональную зависимость, обратно пропорциональную произведению осредненного значения круговой частоты $\langle \omega \rangle$ «какого-то участка» спектра сигнала одного хаотического осциллятора, умноженную на временной сдвиг τ относительно осредненного значения круго-

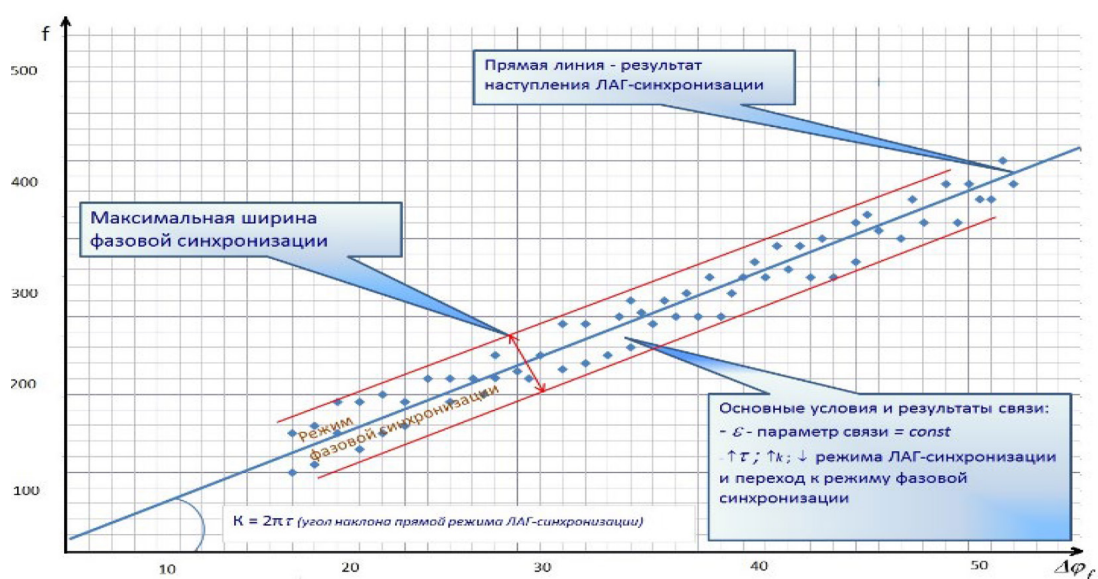


Рис. 4. Результаты расчета разности фаз СК от частоты, связь режима фазовой синхронизации с режимом лаг-синхронизации, зависимость лаг-синхронизации от времени сдвига (для СК просветных сигналов МС)

Fig. 4. Results of calculation of the phase difference of the SK from the frequency, the connection of the phase synchronization mode with the lag synchronization mode, the dependence of the lag synchronization on the shift time (for the SK of the MS transmissive signals)

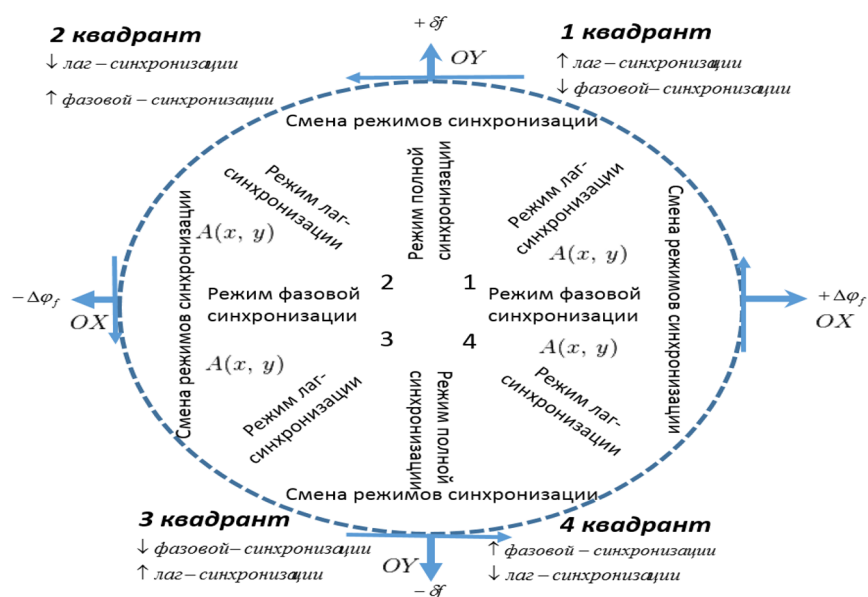


Рис. 5. Круговая диаграмма смены режимов синхронизации в декартовой системе координат в зависимости от «параметра связи» – ε

Fig. 5. Circular diagram of synchronization mode changes in the Cartesian coordinate system, depending on the “link parameter” – ε

вой частоты $\langle \omega \rangle$ «такого в точности участка» второго хаотического осциллятора (или наоборот) (3), но измененную на $\pm 2\pi\delta f$ [10].

$$\varepsilon \sim (\langle \omega \rangle \pm 2\pi\delta f)^{-1} \cdot \tau^{-1}. \quad (3)$$

Следствия анализа формулы (3) и детерминированной хаотичности СК сигнала относительно заданного положения равновесия $\langle \omega_{СК} \rangle$ в конкретных ситуациях показаны на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что для решения задачи учета условий формирования сигнала, процесса его распространения в морской среде, условий приема, детерминированной хаотичности СК относительно заданного положения равновесия в конкретных ситуациях, а главное, это получения максимальной достоверности проведения режима синхронизации при реализации МС, можно использовать области устойчивой фазовой синхронизации и оптимальных условий проявления лаг- и фазовой синхронизации [9].

При этом область оптимальных условий для решения поставленной в статье научной задачи является предпочтительной.

Для МС когерентная компонента на одной приемной антенне (Пр) представляет собой детерминированный процесс либо полностью известный, либо с неизвестными параметрами. Такой подход можно считать особенностью предлагаемого алгоритма обработки нескольких сигналов в точке приема, а именно: в точку приема через радиоканал поступает детерминированный шумоподобный сигнал с хаотическими дискретами и квазидетерминированный шумоподобный сигнал, прошедший через волновод и представленный поверхностным, донным и водным сигналами, несущий в себе информацию о характеристиках изначального сигнала, среде распространения и обнаруженном объекте. Если в точке приема для режима бистатистики или МС провести режекцию для сравнения исходного сигнала с сигналом, прошедшим через



Рис. 6. Следствия работы системы синхронизации при учете детерминированной хаотичности спектральных компонент сигналов относительно заданного положения равновесия и ошибках

Fig. 6. Consequences of the synchronization system operation when taking into account the deterministic chaos of the spectral components of the signals relative to the specified equilibrium position and errors

волновод и представленный поверхностным, донным и водным сигналами, то можно получить первичный сигнал, в котором не будут присутствовать хаотические дискретности детерминированного исходного шумоподобного сигнала.

Теперь на базе первичного сигнала путем передачи его по радиоканалу в точку излучения можно сформировать вторичный зондирующий сигнал, несущий в себе информацию так же, только об обнаруживаемом объекте и среде распространения. Как показывает опыт моделирования, дискретности первичного и вторичного сигналов от цели будут квазикоррелированы (в рамках лаг-синхронизации), а от среды распространения некоррелированы (в рамках фазовой синхронизации).

Это дает возможность получить спектр разности фаз спектральных компонент на одном приемнике и сформировать «портрет» обнаруженного объекта.

Результаты экспериментальных исследований процесса обработки сигналов, их распознавания в ПМ на базе метода «расчета спектра разности фаз ПС»

Для проверки гипотезы возможности синхронизации СК ПС (модельная идентификация в МС) и расчета спектра разности фаз СК (распознавание в ПМ) были использованы основные характеристики просветного стационара (ПрС) «остров Сахалин – остров Итуруп» (Охотское море) (1972 г.) и условия проведения эксперимента (рис. 2) [11].

Излучающая донная база была установлена на шельфе о. Итуруп, две приемные донные базы, разнесенные вдоль свала глубин на расстояние 5 км, – на шельфе м. Левенорна. Таким образом, был сформирован упрощенный вариант реализации ПМ (распознавание объектов и мониторинг водной среды).

Это усложняет обнаружение информационных (идентифицированных в МС) сигналов в условиях помех среды и нестабильности канала распространения ПС [12].

Проведя оценку флюктуаций фазы сигнала заданной частоты для отдельных мод, было обнаружено, что они соответствуют характерной экспериментальной ситуации. Выражение скорости звука для двух границ волновода можно записать в виде следующей эмпирической формулы (4)

$$C \approx \left[\frac{1}{C_o^2} + \frac{1}{\ell} \left(\frac{1}{C_o^2} - \frac{1}{C_1^2} \right) z \right]^{\frac{1}{2}}, \quad C \approx \left[\frac{1}{C_o^2} - \frac{1}{\ell'} \left(\frac{1}{C_o^2} - \frac{1}{(C_1')^2} \right) z \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

где ℓ и ℓ' ; C_1 и C_1' – величины, выражающие толщину волновода и значения скорости звука на его границах для $Z < 0$ $Z > 0$ соответственно. Оценка проводится для случая, когда ось волновода находится на глубине $z=0$, $\ell'=30$ м, $\ell=-160$ м, $C_1=1475$ м/с, $C_1'=1460$ м/с, $C_0=1451$ м/с, $f=400$ Гц. Если принять, что движущийся вблизи оси канала объект перемешивает слой воды толщиной 30 м, то значения собственных чисел для данной ситуации запишутся в следующем виде (5)

$$\chi_m^2 = k_o^2 - \omega^{\frac{1}{3}} \left(m - \frac{1}{2} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{\pi}{\frac{1}{q} + \frac{1}{q'}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad q = \frac{1}{\ell} \left(\frac{1}{C_o^2} - \frac{1}{C_1^2} \right); \quad q' = \frac{1}{\ell'} \left(\frac{1}{C_o^2} - \frac{1}{(C_1')^2} \right), \quad (5)$$

m – номер моды колебаний сигнала.

Флюктуации фазы моды номера « m » относительно случая невозмущенного акустического канала равны (6) [13]

$$\Delta\varphi = \left| \chi_m - \chi'_m \right| \Delta\epsilon, \quad (6)$$

где $\Delta\epsilon$ – размер области возмущения, принимающий значения 30 м в пределах 1 км; χ'_m – собственное число моды номера m в возмущенном волноводе. При $\Delta\epsilon=30$ м получим $|\Delta\varphi_{1,2}|=1,26$ рад; $|\Delta\varphi_{2,3}|=1,1$ рад; $|\Delta\varphi_{3,4}|=0,93$ рад. Расчеты на ПЭВМ для данной ситуации показали, что при таких флюктуациях фаз между модами сигнала возникают флюктуации амплитуд в суммарном сигнале. Их величина достигает порядка 5–10 дБ, что подтверждается результатами, приведенными в [8].

На рис. 7 приведены спектр и спектрограмма флюктуаций фаз искаженных объектом сигналов с горизонтально разнесенных приемников донной антенны [13].

Из результатов видно, что пересечение объектом просветного стационара сопровождается возникновением в спектрах устойчивых СК, которые могут быть эффективно использованы для его регистрации. В этом случае первичным является распознавание и мониторинг среды. После режекции спектра в ПМ возможен расчет спектра разности фаз, что тождественно обнаружению объекта.

Протяженность стационара в этом случае составляет 20 км, частота сигнала подсветки – 388 Гц, расстояние между одиночными приемниками – 200 м. Аналогичные испытания были проведены на трассах протяженностью 30, 45, 60, 210 и 350 километров (характеристика МС) [14].

Следует отметить, что рассматриваемый просветный стационар при дополнении его другими средствами морского приборостроения Специальным конструкторским бюро средств автома-

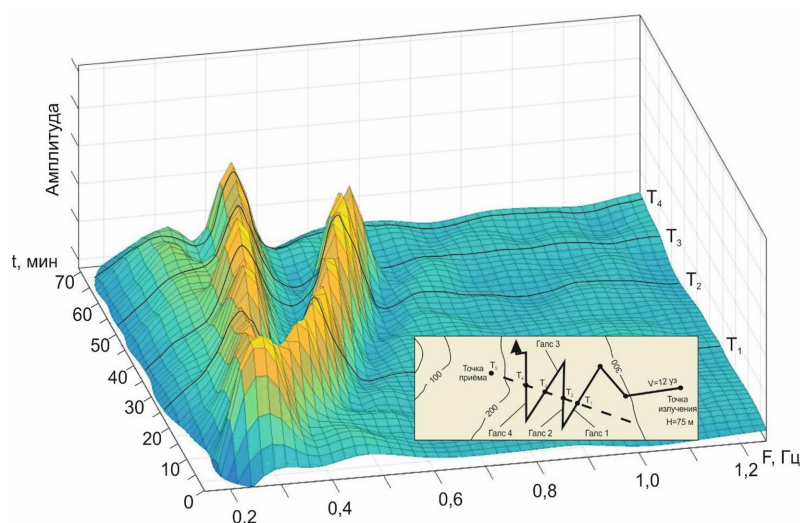


Рис. 7. Спектрограмма флюктуаций фазы сигналов подсветки среды, искаженных движущимся объектом (приемник на дне, излучатель в дрейфе)

Fig. 7. Spectrogram of phase fluctuations of the medium illumination signals distorted by a moving object (receiver at the bottom, emitter in drift)

тизации морских исследований Дальневосточного отделения РАН позднее эффективно использовался на акватории, разделяющей Охотское и Японское моря, при проведении комплексных исследований: сейсмического наблюдения; гидродинамических возмущений, неоднородностей среды и полей объектов различной физической природы.

Заключение

В гидроакустике идентификация МС и ПМ связана через использование закономерностей нелинейного взаимодействия волн. Но эти понятия относятся к разным аспектам: первое – это идентификация объектов с позиционированием, второе – мониторинг полей водной среды. Первое – дает количественные характеристики объекта (физического явления), второе – качественные.

Исходя из этого авторы статьи предложили проблемы идентификации и сложности формирования пространственной структуры МС заменить на более простой подход (аналог): распознавание (идентификацию, классификацию) объектов и мониторинг водной среды ПМ в широком диапазоне частот.

При проведении расчетов использовать более простой математический аппарат проведения расчетов «функции спектра разности фаз принятых просветных сигналов» или «функции разности фаз спектра просветных сигналов».

Понятие «обнаружение» считать для:

- МС – это идентификация с соотносением полученного эхо-сигнала номеру ГЛС, его сформировавшей, с определением настоящего места объекта и направления на него (П – пеленг или КУ – курсовой угол);

- ПМ – это распознавание (классификация) обнаруженных по спектру разности фаз объектов без идентификации и элементов их пространственного позиционирования.

Таким образом, ПМ обеспечивает возможность дальнего обнаружения «акустически слабозаметных» морских объектов по признакам их полей различной физической природы, а идентификация МС осуществляется по характерным признакам спектров и пространственно-временной динамики принимаемых информационных сигналов.

Значит, МС в практике применения – это сложная многоступенчатая архитектура позиционирования объектов, а ПМ – это многоэтапная схема их распознавания.

Или теория просветной гидроакустики есть научное направление, которое объединяет гидрофизику, геофизику и радиофизику. Оно позволяет решать задачи дальнего и сверхдальнего параметрического приема волн малых амплитуд различной физической природы.

Мультистатическая схема – это стационарное просветное гидроакустическое поле, которое используется для мониторинга акваторий. Схема основана на измерении разности фаз спектральных компонент акустических сигналов, которые принимаются на пространственно-разнесенные приемники.

Для подтверждения всего вышеизложенного (как отмечают авторы статьи) это требует новых исследований модельного характера процессов обработки сигналов, их идентификации в МС и распознавания в ПМ на базе «синхронизации спектральных компонент» и «расчета спектра их разности фаз».

Список литературы / References

- [1] Михнюк А.Н. *Методы повышения эффективности функционирования мультистатической системы подводного наблюдения*, дис. канд. физико-математических наук. Москва, 2018, 167 с. [Mikhnyuk A.N. *Methods of increasing the efficiency of the multistatic underwater surveillance system*, PhD in Physics and Mathematics. Moscow, 2018, 167 p. (in Russian)]
- [2] *Автоматизированная система моделирования характеристик гидроакустических каналов и приема волн различной физической природы в морской среде*. Василенко А.М. Патент на изобретение RU 2837306 С 1, 28.03.2025. Заявка № 2024127381 от 16.09.2024. [An automated system for modeling the characteristics of sonar channels and receiving waves of various physical nature in the marine environment. Vasilenko A.M. Patent for invention RU 2837306 С 1, 03/28/2025. Application No. 2024127381 dated 09/16/2024 (in Russian)]
- [3] Стародубцев П.А., Сторожок Е.А., Дорофеев Г.В. Уточнение варианта состава гидроакустической системы в интересах создания новой эффективной технологии функционирования алгоритмов сбора и обработки информации о подводной обстановке, *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2023, 16(6), 759–768 [Starodubtsev P.A., Storozhok E.A., Dorofeev G.V. Refinement of the hydroacoustic system composition option in the interests of creating a new effective technology for the functioning of algorithms for collecting and processing information about the underwater situation, *SibFU Journal. Engineering and technology*, 2023, 16(6), 759–768 (in Russian)]
- [4] Стародубцев П.А., Бакланов Е.Н., Стародубцев Е.П., Мироненко М.В. Помехоустойчивая, широкомасштабная, мультистатическая схема обнаружения возмущений морской среды и ее организационные, технологические и технические характеристики, *Научные труды Дальрыбвтуза*, 2017, 41, 85–97 [Starodubtsev P.A., Baklanov E.N., Starodubtsev E.P., Mironenko M.V. Noise-resistant, large-scale, multistatic scheme for detecting disturbances of the marine environment and its organizational, technological and technical characteristics, *Scientific Papers of Dalrybvtuz*, 2017, 41, 85–97 (in Russian)]
- [5] Стародубцев П.А., Бакланов Е.Н., Стародубцев Е.П., Шевченко А.П. Некоторые аналитические выводы из развития процесса синхронизации спектральных компонент хаотических сигналов в мультистатических схемах, *Двойные технологии*, 2015, 71(2), 64–68 [Starodubtsev P.A., Baklanov E.N., Starodubtsev E.P., Shevchenko A.P. Some analytical conclusions from the development of the process of synchronization of spectral components of chaotic signals in multistatic circuits, *Dual Technologies*, 2015, 71(2), 64–68 (in Russian)]
- [6] Халаев Н.Л., Стародубцев П.А., Эм А.А., Стародубцев Е.П., Бакланов Е.Н., Москаленко Э.В. Реконструктивная акустическая томография и ее теоретические основы, *Научные труды Дальрыбвтуза*, 2020, 53(3), 30–40 [Khalaev N.L., Starodubtsev P.A., Em A.A., Starodubtsev E.P., Baklanov E.N., Moskalenko E.V. Reconstructive acoustic tomography and its theoretical foundations, *Scientific works of Dalrybvtuz*, 2020, 53(3), 30–40 (in Russian)]
- [7] Мироненко М.В., Стародубцев П.А., Бакланов Е.Н., Халаев Н.Л., Москаленко Э.В. Создание дальневосточной системы мониторинга и томографии полей атмосферы, океана и земной коры, *Двойные технологии*, 2018, 84(3), 30–36 [Mironenko M.V., Starodubtsev P.A., Baklanov E.N., Khalaev N.L., Moskalenko E.V. Creation of a Far Eastern monitoring and tomography system for atmospheric, ocean and crustal fields, *Dual technologies*, 2018, 84(3), 30–36 (in Russian)]

[8] Мироненко М. В. Исследование практических возможностей обнаружения подводных объектов как акустических экранов в условиях мелководья с использованием разнесенного излучения-приема, *Сборник трудов ДВ НТК*, 1980, 18, 17–20 [Mironenko M. V. Investigation of the practical possibilities of detecting underwater objects as acoustic screens in shallow water using spaced radiation reception, *Proceedings DV NTK*, 1980, 18, 17–20 (in Russian)]

[9] Мироненко М. В., Малащенко А. Е., Карачун Л. Э., Василенко А. М. *Низкочастотный просветный метод дальней гидролокации гидрофизических полей морской среды: монография*. Владивосток: ДВО РАН, 2006. 173 с. [Mironenko M. V., Malashenko A. E., Karachun L. E., Vasilenko A. M. *Low-frequency lumen method of long-range sonar of hydrophysical fields of the marine environment: monograph*. Vladivostok: Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 2006. 173 p. (in Russian)]

[10] Короновский А. А., Москаленко О. И., Храмов А. Е. Синхронизация спектральных компонент связанных хаотических процессов, *Письма в ЖТФ*, 2004, 30(18), 56–64 [Koronovsky A. A., Moskalenko O. I., Khramov A. E. Synchronization of spectral components of related chaotic processes, *Letters in the Life Sciences*, 2004, 30(18), 56–64 (in Russian)]

[11] Стародубцев П. А., Халаев Н. Л., Димидов В. Е. *Некоторые концептуальные положения процесса мониторинга океанской среды: монография*. Владивосток: Издательский дом Дальневосточного федерального университета, 2012, 222 с. [Starodubtsev P. A., Khalaev N. L., Dimidov V. E. *Some conceptual provisions of the ocean environment monitoring process: monograph*. Vladivostok: Publishing House of the Far Eastern Federal University, 2012, 222 p. (in Russian)]

[12] Стародубцев П. А. *Акустическая томография в процессе обнаружения подводных объектов: монография*. Владивосток: Мор. гос. ун-т им. Г. И. Невельского, 2005. 189 с. [Starodubtsev P. A. *Acoustic tomography in the process of detecting underwater objects: monograph*. Vladivostok: Nevelsky Moscow State University, 2005. 189 p. (in Russian)]

[13] Стародубцев П. А. *Теоретические и экспериментальные исследования возможности применения просветных сигналов в гидроакустической томографии: монография*. Владивосток: Дальнаука, 2003. 258 с. [Starodubtsev P. A. *Theoretical and experimental studies of the possibility of using luminal signals in sonar tomography: monograph*. Vladivostok: Dalnauka Publ., 2003. 258 p. (in Russian)]

[14] Стародубцев П. А., Стародубцев Е. П., Карасев В. В. Мультистатическая схема дальнего обнаружения опасных природных явлений в целях обеспечения безопасного мореплавания, *Сб. докл. Международной научной конференции «Исследования Мирового океана», посвященная 100-летию со дня рождения И. В. Кизеветтера*, 2008, 294–299 [Starodubtsev P. A., Starodubtsev E. P., Karasev V. V. Multistatic scheme of long-range detection of dangerous natural phenomena in order to ensure safe navigation, *Collection of dokl. International Scientific Conference “World Ocean Research”, dedicated to the 100th anniversary of the birth of I. V. Kiesewetter*, 2008, 294–299 (in Russian)]

**Math Modeling.
Numerical Experiment**

**Математическое
моделирование.
Численный
эксперимент**

EDN: AGKSUH

УДК 621.3

Iterative Models for Calculating Magnetic and Electric Circuits in Electrical Machines

Toksan A. Zhakatayev*

*Astana International University
Astana, Kazakhstan*

Received 30.11.2025, received in revised form 31.03.2026, accepted 19.05.2026

Abstract. Autonomous, simple algorithms and computational schemes for iterative calculations have been developed. This allows you to calculate the distribution of magnetic fluxes in closed circuits of electrical machines (EM). These allow for the calculation of magnetic flux distributions in closed circuits of electric machines (EMs). These calculations can be used to calculate induced emfs, adhesion forces, and braking forces arising between the rotor and stator. The computational algorithms are implemented in C++. Is devoted to the issue of developing and implementing new iterative schemes and models for the calculation of magnetic and electric circuits in the most diverse types and designs of electrical machines. Which are available in simple manual programming mode. And they can be implemented on the simplest PCs. In other words, our work and our results are intended for engineers – developers of new electrical machines, structures and equipment. In the new conditions of technological progress for mass and widespread use. Solved a problem of analysis in the theory of calculating magnetic circuits using automation of the computational algorithm. Based on numerical computer calculations. According to it, for a given magnetizing force $F = Iw$, the induced induction B_i is calculated over all sections of a complex nonlinear magnetic circuit and B_A in the air gap. In the scientific and educational literature, this problem is also called the inverse problem, or also the second Kirchhoff's law for a contour of a magnetic circuit. Features of interpolation formulas application in calculation of magnetic characteristics of various circuits are shown. Clarifications were made when using them. It is shown that the Lagrange interpolation formula to the third power (the cubic Lagrange polynomial) in some places exceeds the accuracy of the cubic spline calculation. When calculating magnetic fields, we believe this is due to the error in determining m_i and m_{i+1} at the extreme nodal points for the cubic spline. An algorithm has been implemented in which the program dynamically determines the required interpolation point Z_C . It then selects two symmetrical nodal points to the left of this point (j ; $j-1$) and to the right of it ($j+1$; $j+2$). This flexible algorithm, with dynamically changing nodal points for a third-degree polynomial, guarantees improved Lagrangian interpolation accuracy. This is facilitated by the fact that the steps for the function arguments change quickly and dynamically during the calculations. This ensures the following principles: convenient, simple, accessible, easy, and reliable.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: Toksanzh@yandex.kz

Keywords: iterative algorithm, computational program, compound magnetic circuits, Lagrangian interpolation, cubic spline, electric machine, magnetomotive force, magnetic circuit, electrical circuit.

Citation: Zhakatayev T. A. Iterative Models for Calculating Magnetic and Electric Circuits in Electrical Machines. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(5), 668–681. EDN: AGKSUH



Итерационные модели для расчета магнитных и электрических цепей в электрических машинах

Т. А. Жакатаев

*Международный университет Астаны
Казахстан, Астана*

Аннотация. Разработаны автономные, простые алгоритмы и вычислительные схемы для проведения итерационных расчетов, которые позволяют рассчитать распределения магнитных потоков в замкнутых контурах электрических машин (ЭМ) в режиме ручного программирования. По ним можно рассчитывать наведенные ЭДС, силы сцепления и торможения, возникающие между ротором и статором. Вычислительные алгоритмы реализованы на языке C++. Решена задача анализа в теории расчета магнитных цепей с использованием автоматизации вычислительного алгоритма, на основе численных вычислений, согласно которой по заданной намагничивающей силе $F = I\omega$ рассчитывается наведенная индукция B_i на всех участках сложной нелинейной магнитной цепи и в воздушном зазоре B_A . В научной и учебной литературе данную задачу называют еще обратной задачей, или второй закон Кирхгофа для контура магнитной цепи. Показаны особенности применения интерполяционных формул при расчете магнитных характеристик различных цепей, проведены уточнения при их применении. Показано, что интерполяционная формула Лагранжа в третьей степени (кубический полином Лагранжа) по точности своей местами превосходит результаты расчета по кубическому сплайну при расчете магнитных полей. По нашему мнению, это связано с погрешностью определения m_i и m_{i+1} в крайних узловых точках для кубического сплайна. Реализован алгоритм, когда программа динамично определяет необходимую точку интерполяции Z_C . Затем выбирает две симметричные узловые точки слева от нее (j ; $j-1$) и справа от нее ($j+1$; $j+2$). Такой легко подвижный алгоритм при динамичном изменении самих узловых точек для полинома третьей степени гарантированно повышает точность интерполяции по Лагранжу. Этому способствует то, что шаги по аргументам функции изменяются быстро и динамично в ходе проведения расчетов. То есть реализуются принципы: удобно, просто, доступно, легко и надежно.

Ключевые слова: итерационный алгоритм, вычислительная программа, составные магнитные контуры, интерполяция Лагранжа, кубический сплайн, электрическая машина, магнитодвижущая сила, магнитная цепь, электрическая цепь.

Цитирование: Жакатаев Т. А. Итерационные модели для расчета магнитных и электрических цепей в электрических машинах / Т. А. Жакатаев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(5). С. 668–681. EDN: AGKSUH

Introduction

Electrical machines of the most diverse types and designs are widely used in the everyday life of all people. It is in no way possible, even in brief form, to describe the full breadth of its applications and the depth of its importance. Such a voluminous task does not fit within the framework of a single short scientific article. By virtue of the presence and diversity of information flows, this is a widely

known fact. It should not be, and is not logical, to try to embrace in one review so great a variety of this material.

Most likely this is a function of AI and Big Data, to process very polynomial publications.

One of the important points in the calculation and design of new machines is the methodology for calculating magnetic circuits. And the associated methodology for calculating electric circuits. This task has especially high significance for our country. Because we belong to the group of developing countries. In the sense that both during our time within the Soviet Union and after it, we engaged very little in the development and creation of new machines and new technologies. For the most part, we went along the path of simple consumers and buyers. That is, all the main machinery, machines, instruments, and equipment were brought to us from outside, from other countries. We were mere purchasers and users of ready-made technical equipment. However, time dictates us its new laws and rules. Our youth, who have higher technical education, have grown in number and have become stronger in quality. Therefore, the young generation of engineers is ready to begin the development and creation of new machines, technologies, and equipment. And any new undertakings and projects, as is known, need scientific and theoretical support and technical provision. We hope for the help and support of engineers and scientists from all over the world.

Taking the above into account, our present work is devoted to the issue of developing and implementing new iterative schemes and models for the calculation of magnetic and electric circuits in the most diverse types and designs of electrical machines.

Which are available in simple manual programming mode. And they can be implemented on the simplest PCs. In other words, our work and our results are intended for engineers – developers of new electrical machines, structures and equipment. In the new conditions of technological progress for mass and widespread use.

We have solved a problem of analysis in the theory of calculating magnetic circuits [1–5] using automation of the computational algorithm. Based on numerical computer calculations. According to it, for a given magnetizing force $F = Iw$, the induced induction B_i is calculated over all sections of a complex nonlinear magnetic circuit and B_A in the air gap. In the scientific and educational literature, this problem is also called the inverse problem, or also the second Kirchhoff's law for a contour of a magnetic circuit [1–5].

Features of interpolation formulas application in calculation of magnetic characteristics of various circuits are shown. Clarifications were made when using them.

Theoretical Solution and Results

Most electrical machines (abbreviated EM) are reversible. They can operate both as generators and as motors.

To compose and test a new calculation model, we considered a simplified diagram of an electrical machine [1–7], presented in Fig. 1.

We endeavored to come as close as possible to the size of some actually existing generator. To this end, the initial working drawing was executed on a large sheet of drawing paper. In order to see and understand the real dimensions of a real electrical machine, abbreviated EM. Therefore, the outer diameter of the housing amounted to 352 mm. The length of the housing is 400 mm. The slots on the stator were made wider and deeper to place many windings, so that there would be many conductors on the stator. As a result, the transverse dimension of the stator tooth became smaller,

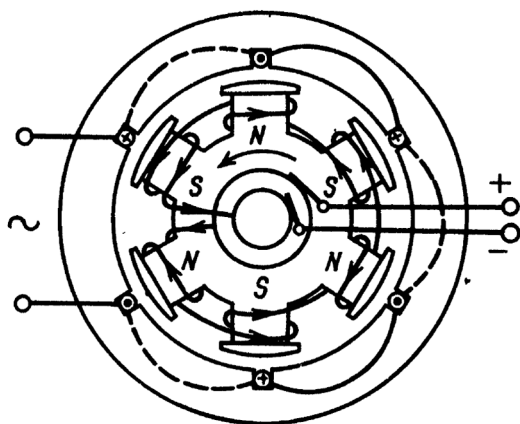


Fig. 1. General diagram of an electric reversible machine [1, 3, 7]

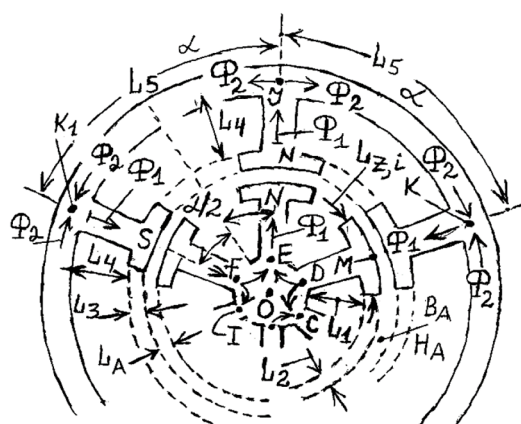


Fig. 2. Detailed scheme of circulation of the magnetic field vector in the rotor and stator in an EM cross-section

and it became almost equal in width to the size of the rotor tooth. In turn, the teeth on the rotor were increased in cross-section, and the diameter of the very post of the tooth was decreased. So that in the space between neighboring teeth of the stator and rotor, as many as possible windings of copper wires could be placed. Thus, we were able to wind 200 turns of wire of 3 mm diameter on one rotor tooth. On one stator tooth, we wound 240 turns of wire of 4 mm diameter. These are otherwise called windings.

Thus we considered specifically the following type of EM in cross-section, which is shown in Fig. 2.

When calculating and designing an EM, an important point is the use of the nonlinear graph of dependence $B = f(H)$ for the magnetic core [1–6], Figure 3. In which the different numerals 1–4 refer to different grades of electrical steel: E-11, E-31, E-42, E-45 [7–12].

Currently, all design calculations are carried out on a PC using a programmable algorithmic language. The design works can include almost the entire range of changes of H , A/m.

Moreover, the specific required values can be any, that is, arbitrary. Therefore, the most correct method is that the values of $B = f(H)$ should be tabulated. Then the necessary number of discrete values of $B_i = f(H_i)$ should be entered into the computational program. With a certain step. For arbitrary values of $H \neq H_i$ (which differ from these support points) all computations are carried out on the basis of using some interpolation formula.

In composing the computational program, we used two interpolation formulas: 1) interpolation by cubic splines; 2) the Lagrange interpolation formula, also cubic, that is, this too is a third-degree polynomial.

2.1. Solution for spline interpolation.

As a working formula we chose the following popular formula [13–25]:

$$S_x^3 = \frac{(x_{i+1} - x)^2(2(x - x_i) + h_x)}{h_x^3} f_i + \frac{(x - x_i)^2(2(x_{i+1} - x) + h_x)}{h_x^3} f_{i+1} + \frac{(x_{i+1} - x)^2(2(x - x_i) + h_x)}{h_x^2} m_i + \frac{(x - x_i)^2(2(x_{i+1} - x) + h_x)}{h_x^2} m_{i+1}, \quad (1)$$

where $m_i = S'_3(x_i)$, $m_{i+1} = S'_3(x_{i+1})$ – are the derivatives of formula (1) at points x_i and x_{i+1} ; f_i, f_{i+1} – are the values of the desired function at these same points, and h_x is the step along the x-coordinate. For an approximate calculation of m_i , the following formulas are given in [13–19]:

$$\begin{aligned} m_i &= \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2h_x}, \quad i = 1, 2, \dots, N-1, \\ m_0 &= \frac{4f_1 - f_2 - 3f_0}{2h_x}, \quad m_N = \frac{3f_N - 4f_{N-1} + f_{N-2}}{2h_x}, \end{aligned} \quad (2)$$

where $m_i = f'_i$ are the values of the derivatives at the nodal points.

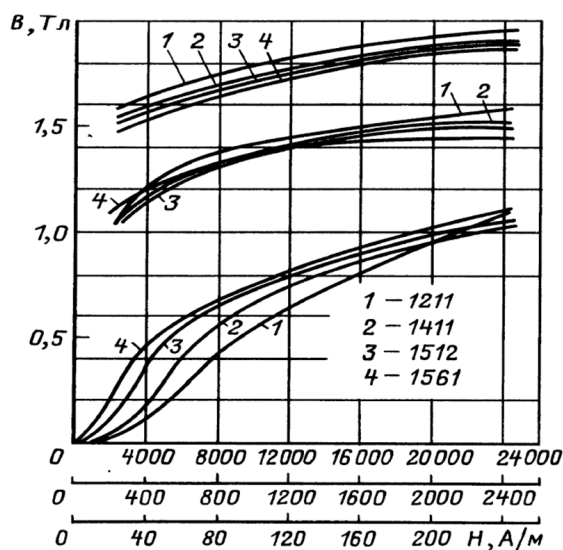


Fig. 3. Magnetization curve of electrical steels of various grades [1, 3, 7]

We developed and composed our own calculation program in C++, which performs computations by formulas (1) and (2).

Formulas (2) represent a simplified variant. As our computational practice has shown, nevertheless, for engineering calculations, it is quite suitable. Only in some cases did the error amount to 0.95 %.

In books, there are also schemes for calculating the coefficients m_i through second-order difference schemes [13–25]. This is the so-called scheme for calculating m_i via the sweep (Thomas) formulas. In our subsequent research, we plan to carry out calculations on the basis of the cubic splines (1). m_i will be computed by the three-point sweep formulas [13–15, 16, 25]. For three-point difference equations for m_i . We are speaking only about calculations in application to magnetic and electric schemes, as we noted at the beginning of this article.

2.2. Application of Lagrange interpolation formulas.

The Lagrange interpolation formulas for one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional interpolation are known to have the forms [13–15, 16, 25]

$$P_l = \sum_{i=0}^l Z_i \prod_{p=0; p \neq i}^l \frac{(x - x_i)}{(x_p - x_i)}, \quad (3)$$

$$P_{lm} = \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^m Z_{ij} \prod_{p=0; p \neq i}^l \prod_{q=0; q \neq j}^m \frac{(x - x_i)}{(x_p - x_i)} \frac{(y - y_j)}{(y_q - y_j)}, \quad (4)$$

$$P_{lmn} = \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^n Z_{ijk} \prod_{p=0; p \neq i}^l \prod_{q=0; q \neq j}^m \prod_{r=0; r \neq k}^n \frac{(x - x_i)}{(x_p - x_i)} \frac{(y - y_j)}{(y_q - y_j)} \frac{(z - z_k)}{(z_r - z_k)}. \quad (5)$$

When composing the calculation program in C++ according to formula (4), we applied the method of successive iteration along the first coordinate (j) with the second coordinate (i) “frozen” and fixed. We explain the said by Figure 4.

That is, at first we take our position (stand) on the coordinate line $i - l$. We apply one-dimensional Lagrange interpolation. Using points 1, 2, 3, 4, we calculate point z_1 . More precisely, we calculate the value of the two-dimensional function $f(z_1)$ at this point. Next, we move to coordinate line i . We use the values of function $f_{i,j}$ at points 5, 6, 7 and 8. We calculate the value of function $f(z_2)$ at point z_2 . Next, we move to coordinate line $i + 1$. We use the values of function $f_{i,j}$ at points 9, 10, 11 and 12. We calculate the value of function $f(z_3)$ at point z_3 . Similarly, we find $f(z_4)$ for point z_4 .

Now we know four values of f_i for four points z_i . We once again (that is, reapply) one-dimensional Lagrange interpolation for these four points z_i and calculate the value of f_c for point z_c . Thus, we have calculated two-dimensional Lagrange interpolation. The four points for each coordinate were deliberately chosen. In this case, the Lagrange interpolation formula becomes a cubic polynomial. With the correct choice of density (frequency) of nodal points, a third-degree polynomial describes all experimental curves and graphs with sufficient accuracy. With any steepness and curvature that can be observed in engineering practice.

Computational practice has shown that when using polynomials of degree 3 or less, there are no oscillations or “spikes” in the calculated point values outside the permissible range. This means that sudden spikes and unnecessary jumps do not occur. Lagrange polynomials of lower degrees are no different from spline functions. In terms of calculation accuracy and smoothness requirements,

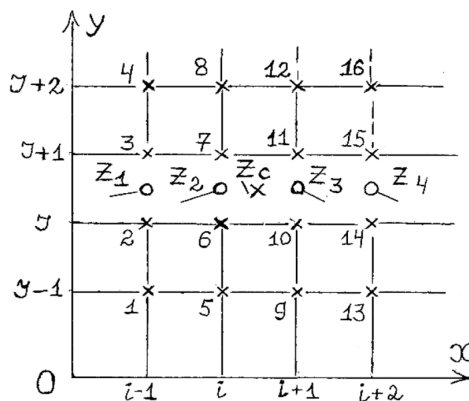


Fig. 4. Schema of a grid stencil on the plane for two-dimensional iteration

functions in the interpolation domain can be even better. We implemented an algorithm in which the program dynamically determines the required interpolation point Z_C . It then selects two symmetrical nodal points to the left of it (j ; $j-1$) and to the right of it ($j+1$; $j+2$). This flexible algorithm, with dynamically changing nodal points for a third-degree polynomial, guarantees improved Lagrange interpolation accuracy. This is facilitated by the fact that the steps along the function arguments change quickly and dynamically during the calculations. This ensures the following principles: convenient, simple, accessible, easy, and reliable.

It's clear that we didn't originate this solution: to ensure that the x coordinate (variation i) is fixed when moving along the y coordinate (variation j). This is noted, for example, in [14–19]. However, it's one thing to merely sketch this out, just briefly, superficially. Just as an idea. What we've accomplished in this paper is quite another. Specifically, we've described this working algorithm in detail, based on dotted line diagram 4. Such a detailed, simple, and clear description of this process is necessary and useful for various programmers, calculators, engineers, and designers. This is so they can independently develop and compile correct computational algorithms and programs. The ability to present material clearly, intelligibly and completely is a great and useful thing.

Let's now move on to examining three-dimensional interpolation using formula (5). We add another axis, OZ , to Figure 4. It's not visible in Figure 4 because it's perpendicular to the plane of the drawing. We must select four slices, four planes, along this axis. They are parallel to this initial OXY plane. Four points $z_{c,k}$ must be calculated on these four planes. More precisely, four values of the function $f(z_{c,k})$, $k = 1, 2, 3, 4$ – must be calculated. Finally, a single value, $f(w)$, is calculated from these values – this is the unknown value of the function at the interpolated point w in three-dimensional space $[x, y, z]$. In this case, one-dimensional Lagrange interpolation was used when iterating (“ran”) through the values of k .

What is the purpose of iteration? By repeatedly repeating the calculations using one-dimensional interpolation, we arrive at multidimensional interpolation based on iteration. That is, we perform iterative runs as (i, j, k) changes.

The world of engineering physics and engineering technologies is limited primarily to three-dimensional functions: density, volume, torque, and so on. Therefore, we limited our consideration to three-dimensional interpolation using both Lagrangian and cubic spline methods.

Complete proofs of formulas (4) and (5) are very rare. Of all the books listed in the bibliography, we found a complete proof in only one source [17]. Engineers are also typically very inquisitive; they also want to know any theory in its entirety and depth.

2.3. Iterative computations of magnetic fluxes in EM contours.

Consider Figure 2. Circuits $OJKO$ and OJK_1O are symmetrical. In them, the magnetic fluxes Φ_i – are also mirror-symmetrical. Due to the complete symmetry of all six circuits of this EM, we show detailed calculations for only one circuit. Therefore, the magnetic driving force (mmf) of a single closed loop has the form

$$F = 2(H_1L_1 + H_4L_4 + H_2L_2 + H_3L_3 + H_4L_4) + H_5L_5 + H_{10}L_{10}$$

where $F = wI$, w – is the number of turns in the winding, $L_{10} = s(DE) = s(FE)$ [m], H [A/m], L [m], F and I is the current [A].

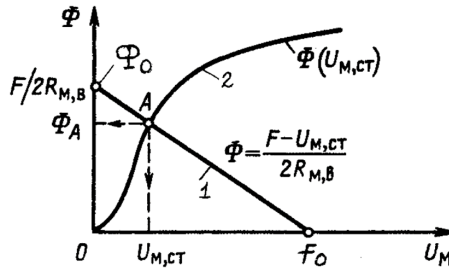


Fig. 5. Diagram explaining the iterative calculations of nonlinear magnetic fluxes in closed loops [1–6]

Further calculations are based on an iterative scheme, which is very well explained in Figure 5 from [1–6].

Here, $\Phi_0 = \frac{F}{2R_{M,B}}$, $R_{M,B} = \frac{L_A}{\mu_0 S}$ – is the magnetic resistance of the air gap.

During the iteration, the calculation program “moves” from point Φ_0 to point F_0 with a certain step: $h_F = \frac{F_0 - \Phi_0}{n_h}$. During the iteration, $\Phi_{h,i}$ is constantly compared with the values of $\Phi(U_{M,CT})$

along curve line 2 (OAΦ). The values of $\Phi_{h,i}$ relate to the straight line 1 ($\Phi_0 - F_0$), Figure 5. When the specified accuracy limit is reached, the calculations are stopped and the results are displayed. This is how the value of the magnetic flux in the EM air gap is calculated. At point A, the difference between $\Phi_{h,i}$ and $\Phi(U_{M,CT})$ will be zero or very small. The proximity limit is specified. Point A is the air gap. The air gap is the space between the rotor and stator teeth. In our test calculations, $L_A = 1.3$ mm.

Results: with a rotor winding current of $I = 2$ A, $B_A = 0.166$ T; $I = 3$ A, $B_A = 0.25$ T. And this is when the current is only in the rotor winding. If additional current is applied to the stator winding with the same magnetic field orientation, the B_A value can double. If the stator winding is connected in antiphase to the rotor, the B_A value will decrease by almost half.

Why is the air gap magnetic field induction value B_A so important to know? The answer is that it can be used to calculate the induced e.m.f. In the stator winding, when the EM operates in generator mode [1–12]

$$E_s = 4.44 f_1 w_2 \Phi_A, \quad (6)$$

where f_1 is the rotor speed, Hz, w_2 is the number of turns (windings) on one stator tooth, $\Phi_A = B_A S_A$.

As proof that we can indeed compose logical and dynamic algorithms and write computational programs ourselves, we present two small pieces, two subroutines in C++. These are part of the programs we have written. We write such programs ourselves, never using ready-made templates or ready-made algorithms. We have never used prompts from IT systems; AI is foreign to us and we do not use it. We are happy that we can work independently. From the very beginning, from scratch, from the very beginning, we can compose computational algorithms and program everything ourselves. We have more than 45 years of scientific and teaching experience.

/* subroutine for computing B for the air gap */

#include <conio.h>

```

#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <iostream>
using namespace std;

int main()
{
    float const pi=3.14159;
    float l1=75e-3, l2=6e-3, l3=l2, lvoz = 1.3e-3, l4=61e-3, l5=(pi/3)*172e-3, l10=22e-3;
    float miuo = 4 * 3.14159e-7, miugel = 5000.0, rvoz=99e-3, alfavoz = 25*2*pi/180;
    float avoz=alfavoz*rvoz, l2obsh=400e-3 /* overall length */;
    ma=miuo*miugel, svoz=avoz*400e-3;
    float lobsh= 2*(l1+l2+l3+l4+lvoz)+l5+l10;
    printf ("\n svoz=%10.3f", svoz);
    printf ("\n l5=%10.3f", l5);
    int n1=200, n2=240, til = 3; /* xxxxx */
    float fmlmax=til*n1*2, rmvoz=lvoz/(miuo*svoz), fbmax=fmlmax/(2*rmvoz),
    k1=fbmax/fmlmax;
    float kiter = 0.57, hxf=kiter*fmlmax, ay=hxf*k1, fteki= fbmax-ay;
    float s1=12*400e-6, s2=avoz*400e-3, s3=avoz*400e-3, s4=12*400e-6, s5=8*400e-
    6, s10=15*400e-6;
    float h1=fteki*l1/(s1*ma), h2=fteki*l2/(s2*ma), hvoz=fteki*lvoz/(svoz*miuo);
    float h3=fteki*l3/(ma*s3), h4= fteki*l4/(ma*s4), h5=fteki*l5/(ma*s5),
    h10=fteki*l10/(ma*s10);
    float hobsh= 2*(h1+h2+h3+h4+hvoz)+h5+h10, bvoz=fteki/(svoz);
    printf ("\n hobsh=%16.4f, hxf=%16.4f", hobsh, hxf);
    printf ("\n fteki=%16.4f, bvoz=%16.4f", fteki, bvoz);
    printf ("\n\n END RUN ");
    getch();
    return 0;
} /* end of subroutine */

/* Subroutine for computing one-dimensional Lagrange interpolation */
#include <conio.h>
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <iostream>
using namespace std;

int main()
{
    float yf, yf1, z1, z2, z3, z4, z5, z6, z11, z12, z13, z14, sf1, sf2, sf3;
    int i, i1, i2, i3, i4, i5, i6, i7, i8, j, j1, j2, j3, j4, j5, j6, j7, j8;
    float fx1[4][4] = {{3.0,7.0,11.0,15.0}, {5.0,9.0,13.0,17.0}, {7.0,11.0,15.0,19.0}, {9.0,13.0,17.0,19.0}};
    int x1[4] = {1,2,3,4}, y1[4]={1,3,5,7}, u[4]={1,3,5,7}, v[4]={1,3,5,7};
    float x[4], y[4][4], fx2[4];

```

```
int hx1[15], xx3[15], xx1[15], xx2[15];
int x1x=4, y1y=4, k1, k2, a1, a2, a3, a4;
j=1; j5=j-1; j6=j; j7 = j+2;
for (i1 = j5; i1 <= j7; i1++)
{
    yf=0.0;
    for (i2=j5; i2<=j7; i2++)
    {
        z11=1.0; z12=1.0;
        for (j2=j5; j2<=j7; j2++)
        {
            if (j2!= i2)
            {
                a1 = x1x – u[j2];
                a2 = u[i2] – u[j2];
                z11 = z11*a1;
                z12 = z12*a2;
            }
        }
        yf=yf+(z11/z12)*fx1[i1][i2];
    }
    fx2[i1]=yf;
    printf (“\n fx2[i1]=%10.3f”, yf);
}
yf1=0.0;
for (i3=j5; i3<=j7; i3++)
{
    z13=1.0; z14=1.0;
    for (j3 = j5; j3<=j7; j3++)
    {
        if (j3!=i3)
        {
            a3 = y1y – v[j3];
            a4 = v[i3]-v[j3];
            z13 = z13*a3;
            z14 = z14*a4;
        }
    }
    yf1 = yf1 + (z13/z14)*fx2[i3];
}
sf3=yf1;
printf (“\n sf3=%10.3f”, sf3);
```

```

/* printf (“\n xz=%8d, xx=%8d, j=%4d”, xz, xx, j);*/
printf (“\n\n END RUN “);
    getch();
    return 0;
    }
/* end of subroutine */

```

Discussion

Our critics may say: when there is MATLAB, Mathcad, Ansys (and other similar ones), why write other new, “manual” programs for computing by Lagrange interpolation and by cubic splines? And perform iterative computations in the so-called “manual” mode of programming in known languages. Is this not extra work?

Answer. Such powerful and mobile programming languages as C++, Fortran, QBasic64 possess a whole range of high merits and positive sides. These include: their accessibility, simplicity of debugging and operation, flexibility, mobility, and reliability. They do not require excessively powerful, very modern, and expensive computers. They can autonomously operate and be launched on many old and simple models of computers and laptops. Installation packages do not require large volumes of permanent and RAM, they are simple and reliable in operation. In general, convenient, simple, accessible, reliable, flexible, and mobile.

With the so-called “manual” programming, it is simple, easy, and convenient to get inside any program code, to change the steps along spatial and temporal coordinates. To vary many parameters of the computational scheme in a wide desired range. To find out the computation errors along all spatial and temporal coordinates. Which, for example, in MATLAB, Mathcad, Maple, and others, is impossible to do quickly. That is, in them, “manual” programming is impossible to apply. “Manual” means when all the program code, all computational steps, and algorithms the engineer writes himself in detail, step by step. Relying upon and using, of course, already known and proven mathematical and physical formulas, calculation schemes, and models.

To understand the sense of the said, let us turn to a distant analogy. One can board an airplane and arrive at the destination. In doing so, they see nothing, make out nothing of all that exists on the ground, which remained there far below. Or one can travel the same distance by car. On the way, studying, learning, and remembering all the beautiful places. So it is here in “manual,” dynamic programming. All the charms and merits are learned during painstaking, individual, labor-intensive work. That is, when writing a program that works according to known, widespread formulas. All these working computational formulas are always right there, in front of the engineer. He can see and comprehend all the weak and strong sides here, and visually. Is this not wonderful?

One can give an example from another field. For example, issues of heat transfer. In open access, there are always many reference books in which various reliable formulas are given for calculating Nusselt numbers $Nu = (ad)/\lambda$. For different regimes of flow of a liquid or gas. In such cases it is also easier and simpler to carry out calculations when, by a formula, the engineer himself composes a computational program for himself according to our demonstrated method of “manual” programming. In ready-made, big and powerful computational packages (MATLAB, Mathcad, Maple, SolidWorks, Ansys and the like – now there are many of them in software service) the design engineer does not

see the internal working formulas, does not know the internal kitchen, does not know the internal computational technology. Figuratively speaking, he simply eats a ready-made dish. While not knowing what it is made of, and not knowing the technology of preparing this food. Therefore, many researchers are adherents of “manual” programming. Mobile programming.

We can also consider an example from chess. Yes, computer chess programs play faster and more powerfully than a human. Thousands, and perhaps millions of game variants and combinational moves are loaded into them. But nevertheless, people (that is, humans) continue to play chess. New champions appear. Living people create new moves, new solutions, new combinations. The popularity of playing chess among living people only increases with each year. So too with manual programming. It will not “die”. It will only develop forward.

People are drawn to simple, accessible, free, reliable, and mobile technologies. The potentially numerous audience of consumers must and should include retirees who are alive and well. Alongside the great mass of working (active) engineers, bachelors, master’s students, doctoral students, and other categories of scientific and technical people who are working at the present time. A person must not be forbidden to think, dream, and create at any age. One must not set barriers and brakes in the way of creative work at any age. Let every person create and build at any time, at any age, when he has the opportunity. Working even at home. Let a person make an independent, feasible contribution to world science and technology – even with his small steps. Which he is capable of. This is where the principles and logic of humanism, goodness, and justice lie. The modern popular motto is this: science, technology, and research – to the broad masses of the people.

Therefore, our work is appropriate, very useful, and in demand for many specialists and production engineers. It contains new theoretical solutions, algorithms, and programs.

We will now discuss a new, previously unknown idea for using formula (6). This formula calculates the induced emf in the rotor winding. It is based on the value of magnetic induction B_A in the air gap. When generators and motors are large, the mass of individual rotor teeth, together with the wires wound on them, can reach large (significant) values. For example, this can be not just a few kilograms, but tens of kilograms in weight. Rotational speeds and frequencies can also be significant. In such cases, the centrifugal force of inertia can be quite large, leading to tensile deformation. This, in turn, can lead to a reduction in the air space (air gap) between the rotor and stator teeth. It’s clear that these strains will be very small. From the perspective of the large geometric dimensions of the machine, this will seem insignificant. However, we must be aware that a change in the air space layer δ_A by even tenths of a millimeter can significantly alter the level of the induced, generated e.m.f.

Therefore, we assume that formula (6) can be applied to practically detect changes (or fluctuations) in δ_A . This can be done by observing the generation of E_s in the stator winding. If the rotor serves as an electromagnet, this will be possible.

Added to this is the problem of linear thermal expansion (elongation) of individual stator and rotor teeth, which occurs as a result of heating these bodies. These changes can be calculated using simple formulas taught in standard heat transfer courses. We are confident that engineers can solve this problem independently. However, these results also lead to a decrease in δ_A . Therefore, solving this problem is also important and relevant for engineers who design new electrical machines and mechanisms.

Conclusions

1. Autonomous, simple algorithms and computational schemes for iterative calculations have been developed. They allow calculating the distributions of magnetic fluxes in closed contours of electrical machines (EM). Using them, one can compute induced emfs, adhesion, and braking forces arising between rotor and stator. The computational algorithms are implemented in C++. In manual programming mode. On simple and affordable computers. For mass and widespread use.

2. It is shown that the Lagrange interpolation formula of the third degree (cubic Lagrange polynomial) in places surpasses in accuracy the results of calculation by a cubic spline. In calculating magnetic fields. In our opinion, this is related to the error of determining m_i and m_{i+1} at extreme nodal points.

3. An algorithm has been implemented in which the program dynamically determines the required interpolation point Z_C . It then selects two symmetrical nodal points to the left of it (j ; $j-1$) and to the right of it ($j+1$; $j+2$). This flexible algorithm, with dynamically changing nodal points for a third-degree polynomial, is guaranteed to improve the accuracy of Lagrange interpolation. This is facilitated by the fact that the steps along the function arguments change quickly and dynamically during the calculations. Thus, the following principles are implemented: convenient, simple, accessible, easy, and reliable. Oscillations of the function between nodal points are eliminated, which earlier could occur in interpolation calculations when the number of working points exceeded five.

References

- [1] Ionkin P. A. (ed.), Mel'nikov N. A., Darevskiy A. I., Kukharkin Ye. S. *Theoretical foundations of electrical engineering*. Moscow, 1965. 733 p. (in Russian)
- [2] Popov V. S. *Theoretical electrical engineering*. Moscow, 1975. 560 p. (in Russian)
- [3] Zeveke G. V., Ionkin P. A., Netushil A. V., Strakhov S. V. *Fundamentals of circuit theory*. Moscow, 1989. 528 p. (in Russian)
- [4] Yevdokimov F. Ye. *Theoretical foundations of electrical engineering*. Moscow, 1981. 488 p. (in Russian)
- [5] Burtayev YU. V., Ovsyannikov P. N. *Theoretical foundations of electrical engineering*. Moscow, 2013. 552 p. (in Russian)
- [6] Bessonov L. A. *Theoretical foundations of electrical engineering*. Moscow, 1973. 750 p. (in Russian)
- [7] Tokarev B. F. *Electrical machine*. Moscow, 1989. 672 p. (in Russian)
- [8] Ivanov-Smolenskiy A. V. *Electrical machines*. Moscow, 1980. 928 p. (in Russian)
- [9] Pantyushin V. S. (ed.) and others. *General Electrical*. Moscow, 1970. 568 p. (in Russian)
- [10] Gerasimov V. G. (ed.) and others. *Electrical engineering*. Moscow, 1965. 480 p. (in Russian)
- [11] Molchanov A. P., Znanadporov P. N. *Electrical Engineering Course*. Moscow, 1976. 480 p. (in Russian)
- [12] Yevsyukov A. A. *Electrical engineering*. Moscow, 1979. 248 p. (in Russian)
- [13] Volkov Ye. A. *Numerical methods*. Moscow, 1987. 248 p. (in Russian)
- [14] Kalitkin N. N. *Numerical methods*. Moscow, 1978. 512 p. (in Russian)
- [15] Alberg Dzh., Nil'son E., Uolsh Dzh. *Spline theory and its applications*. Moscow, 1972. 316 p. (in Russian)

- [16] Marchuk G.I. *Methods of computational mathematics*. Moscow, 1989. 608 p. (in Russian)
- [17] Berezin I.S., Zhidkov P.P. *Calculation methods*. Vol.1. Moscow, 1959. 464 p. (in Russian)
- [18] Bakhvalov N.S. *Numerical methods*. Moscow, 1975.-631 p. (in Russian)
- [19] Samarskiy A.A., Gulin A.V. *Numerical methods*. Moscow, 1989. 432 p. (in Russian)
- [20] Miln V.E. *Numerical analysis*. Moscow, 1951. 291 p. (in Russian)
- [21] Demidovich B.P., Maron I. A. *Basics of Computational Mathematics*. Moscow, 1966. 664 p. (in Russian)
- [22] Danilina N. A., Dubrovskaya N. S., Kvasha O.P., Smirnov G. L., Feklisov G.I. *Numerical methods*. Moscow, 1976. 368 p. (in Russian)
- [23] Bakhvalov N. S., Zhidkov N. P., Kobel'kov G. M. *Numerical methods*. Moscow, 1987. 600 p. (in Russian)
- [24] Stechkin S. B., Subbotin YU. N. *Splines in Computational Mathematics*. Moscow, 1976. 249 p. (in Russian)
- [25] Il'ina V. A., Silayev P. K. *Numerical methods for theoretical physicists*. Vol. 1. Moscow - Izhevsk, 2003. 132 p. (in Russian)

**Information and
Communication
Technologies**

**Информационно-
коммуникационные
технологии**



Electrical Complexes and Systems
Электротехнические комплексы и системы

EDN: BNQMFJ

УДК 004.85: 004.93: 621.316.13:621.3.019.3

**Automatic Classification of Power Outage Causes
in 0.4 kV Networks Based
on Text Records Using Machine Learning**

Vadim E. Bolshev^{a*},

Alina V. Vinogradova^a and Igor O. Volynets^b

^aFederal Scientific Agroengineering Center VIM

Moscow, Russian Federation

^bUsetech Bel LLC

Minsk, Belarus

Received 17.11.2025, received in revised form 01.04.2026, accepted 19.05.2026

Abstract. This work presents a study dedicated to the development and evaluation of machine learning algorithms for automating the identification of the causes of power outages in 0.4 kV electrical networks. The urgency of this task is due to inaccuracies in maintaining reporting documentation, which are caused by non-standardized wording and errors in the log of emergency and planned outages, thus hindering subsequent analysis and the adoption of measures to improve reliability. The proposed approach is based on the analysis of textual information concerning the progress of fault elimination and its subsequent comprehensive preprocessing, including normalization, lemmatization, and vectorization using the TF-IDF weighting method, which allows the text descriptions to be converted into a «term-document» matrix. Since identifying the causes of power outages is a multiclass classification problem, three algorithms were tested: logistic regression, random forest, and gradient boosting (LightGBM). Model quality was evaluated using cross-validation with stratified splitting and on an independent test sample. The best results were demonstrated by the logistic regression model, which achieved an Accuracy of 0.864 and an F1-score with micro-averaging of 0.866 on the test set, confirming the high practical applicability of the proposed approach. Error analysis showed that the main barriers to improving accuracy are spelling errors in the source data and the ambiguity of the classification system itself, where a single event can be assigned to multiple categories. Based on the results obtained, recommendations for further improving classification quality were formulated. These include both data enhancement (increasing the sample size, error correction at the input stage, improving the cause classifier) and the application of more complex approaches, such as automatic text correction, the use of embeddings to account for semantics, and the

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: vadimbolshev@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5787-8581 (Bolshev)

ResearcherID: M-8440-2018 (Bolshev)

Scopus ID: 57201923106 (Bolshev)

application of deep neural networks.

Keywords: automatic cause identification of power outages, 0.4 kV electrical networks, emergency and planned outage log, machine learning, multi-class classification problem, vector representation of text documents, text classification.

Citation: Bolshhev V.E., Vinogradova A.V., Volynets I.O. Automatic Classification of Power Outage Causes in 0.4 kV Networks Based on Text Records Using Machine Learning. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(5), 684–695. EDN: BNQMFJ



Автоматическая классификация причин отключений в сетях 0,4 кВ по текстовым отчетам с применением машинного обучения

В. Е. Большев^а, А. В. Виноградова^а, И. О. Волынец^б

^аФедеральный научный агроинженерный центр ВИМ
Российская Федерация, Москва

^бООО «Юзтех Бел»
Беларусь, Минск

Аннотация. В работе представлено исследование, посвященное разработке и оценке алгоритмов машинного обучения для автоматизации идентификации причин отключений электроэнергии в электрических сетях 0,4 кВ. Актуальность задачи обусловлена неточностями в ведении отчетной документации, вызванными нестандартизированными формулировками и ошибками в журнале учета аварийных и плановых отключений, что затрудняет последующий анализ и принятие мер по повышению надежности. Предложенный подход основан на анализе текстовой информации о ходе устранения аварий и их последующей комплексной предобработке, включая нормализацию, лемматизацию и векторизацию с использованием метода взвешивания TF-IDF, что позволяет преобразовать текстовые описания в матрицу «терм-документ». Так как идентификация причин отключений электроэнергии является задачей многоклассовой классификации, были протестированы три алгоритма: логистическая регрессия, случайный лес и градиентный бустинг (LightGBM). Оценка качества моделей проводилась с использованием кросс-валидации со стратифицированным разбиением и на независимой тестовой выборке. Наилучшие результаты показала модель логистической регрессии, достигшая на тестовой выборке точности (Accuracy) 0,864 и F1-меры, с микроусреднением 0,866, что подтверждает высокую практическую применимость предложенного подхода. Анализ ошибок показал, что основными барьерами для повышения точности являются орфографические ошибки в исходных данных и неоднозначность самой системы классификации, когда одно событие можно отнести к нескольким категориям. На основе полученных результатов сформулированы рекомендации по дальнейшему улучшению качества классификации. Они включают как совершенствование данных (увеличение выборки, коррекция ошибок на этапе ввода, улучшение классификатора причин), так и применение более сложных подходов, таких как автоматическая коррекция текста, использование эмбедингов для учета семантики и применение глубоких нейронных сетей.

Ключевые слова: автоматическая идентификация причин отключений электроэнергии, электрические сети 0,4 кВ, журнал учета аварийных и плановых отключений, машинное обучение, аварийные отключения, задача многоклассовой классификации, векторное представление текстовых документов, классификация текста.

Цитирование: Большев В. Е. Автоматическая классификация причин отключений в сетях 0,4 кВ по текстовым отчетам с применением машинного обучения / В. Е. Большев, А. В. Виноградова, И. О. Волюнец // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(5). С. 684–695. EDN: BNQMFJ

Введение

На сегодняшний день одной из острых проблем повышения эффективности производств является острый дефицит рабочей силы [1], причем организации отрасли энергетики не стали исключением: в 2024 г., согласно исследованиям ВШЭ [2], дефицит работников в энергетике составил 95,4 тыс. человек. При этом спрос на высококвалифицированных специалистов растет опережающими темпами, так, дефицит инженеров в 2022 г. за один год поднялся на 43,5 % [3]. Данная проблема отражается на качестве многих выполняемых работ, одним из примеров являются неточности в оформлении отчетной документации. Так, имеется проблема ведения журнала учета аварийных и плановых отключений в электрических сетях, заполняемого диспетчерской службой электросетевой компании. Среди всей информации, представленной в этом журнале, есть записи, посвященные описанию хода устранения отключений электроэнергии. Журнал заполняется во время оперативных переговоров с ремонтными бригадами [4], содержит нестандартизированные формулировки, ошибки и пропуски важной информации. В результате на основе такой информации существует некоторое количество ошибочно определенных причин аварий, что затрудняет проведение достоверного анализа для поиска наиболее эффективных мер по снижению числа аварий [5, 6]. Кроме того, для электрических сетей ниже 35 кВ отсутствуют нормативные документы с требованиями по описанию и классификации причин отключений.

Для решения вышеописанной проблемы была поставлена гипотеза о возможности использования методов машинного обучения (Machine Learning, ML) для автоматического определения причин аварий на основе текстовой информации о ходе устранения отключений. При этом эмпирическая гипотеза заключается в том, что точность ответов подхода, построенного на методах машинного обучения, будет выше точности определения причин отключений специалистами диспетчерской организации. На предыдущем этапе исследования [7] был проведен латентно-семантический анализ исследуемых данных (записей в журнале учета аварийных и плановых отключений), который позволил выявить паттерны, присущие определенному текстовому описанию причин аварий, а также определить возможность использования методов машинного обучения для поставленной задачи. При этом была отмечена возможность решения задачи как глубокими нейронными сетями, так и более классическими методами: логистической регрессией, деревьями решений и т.д.

Цель исследования – разработать модель машинного обучения для классификации причин аварий на основе текстовой информации о ходе устранения отключений.

1. Материалы и методы

В качестве исходных данных использовалась информация об аварийных отключениях электроэнергии на ВЛ 0,4 кВ в одном из центральных регионов РФ, взятая из журнала учета аварийных и плановых отключений в электрических сетях за 2018–2020 гг. Из этих данных был выделен корпус документов, содержащий текстовую информацию о ходе устранения отключений, нормализован, лемматизирован и преобразован в векторное пространство методом взвешивания на основе веса терм (TF-IDF).

Полученное векторное пространство использовалось в качестве входных данных для моделей машинного обучения при классификации причин отключений, при этом 10 % было взято для тестовой выборки. В качестве моделей машинного обучения использовались 3 классификатора: логистическая регрессия, алгоритм случайного леса и алгоритм градиентного бустинга LightGBM Classifier. Поиск оптимальных параметров классификаторов осуществлялся методом поиска по сетке GridSearchCV с кросс-валидацией со стратифицированным разделением. Выбор лучшего классификатора осуществлялся на основе анализа метрик качества ассигасу, precision, recall, f1-меры и его проверки на тестовой выборке. В конце исследования проведен анализ факторов, влияющих на ошибки классификации, и определены направления по повышению качества автоматической классификации причин аварий на основе текстовой информации о ходе устранения отключений.

Проведение исследований производилось на языке программирования Python в среде разработки Jupyter notebook (ver. 7.0.6) программного комплекса Anaconda Python. Для работы с табличными данными применялась библиотека Pandas (ver. 2.1.4), для построения графиков – Matplotlib (ver. 3.8.0) и Seaborn (ver. 0.12.2). Нормализация текста проводилась средствами модуля регулярных выражений re (ver. 0.12.2), лемматизация – средствами библиотеки расширенной обработки естественного языка SpaCy (ver. 3.7.6). Создание векторного пространства в виде TD-IDF-матрицы и классификация причин аварий на основе этого пространства выполнялись средствами библиотеки для машинного обучения Scikit-learn (ver. 1.2.2), а также фреймворка градиентных бустингов LightGBM (ver. 4.1.0).

2. Результаты

2.1. Анализ и подготовка данных для машинного обучения

Исходные данные для настоящего исследования включили в себя 2345 случаев аварийных отключений электроэнергии. Кардинальность значений причин отключений составила 22, при этом наблюдался существенный дисбаланс классов – на класс «Срабатывание АВ» приходилось 52,2 % всех случаев (рис. 1). Такой дисбаланс обусловлен сложностью точной идентификации причины аварии в некоторых ситуациях, особенно в условиях нестабильных аварийных режимов (например, при схлестывании проводов). При этом пять причин отключений электроэнергии отражены только 1–2 событиями. Для снижения влияния дисбаланса классов на каче-

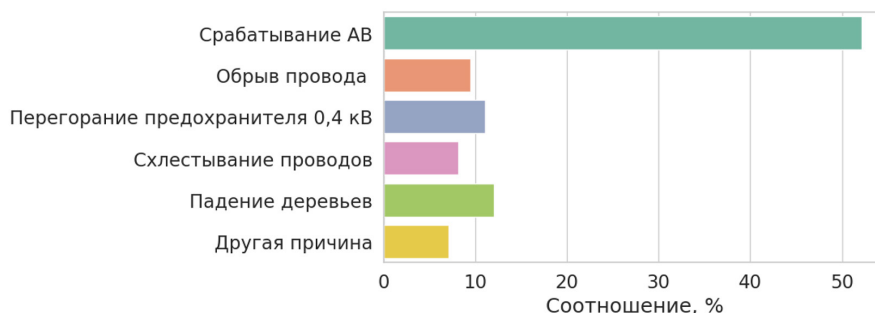


Рис. 1. Распределение частоты встречаемости причин отключений

Fig. 1. Distribution of the frequency of occurrence of reasons for outages

ство модели машинного обучения было принято решение объединить редкие классы (с менее чем 4 наблюдениями) в одну категорию. Для подготовки данных к обучению алгоритмов машинного обучения категориальные значения признака «причина отключения» были преобразованы в числовой формат с помощью метода кодировки метки (Label Encoding) [8].

Корпус текстовых данных, отражающих хронологию устранения аварийных отключений электроэнергии, был предварительно обработан для приведения к унифицированному виду. В рамках предобработки были выполнены следующие операции: лексическая унификация (удаление лишних пробелов, стоп-слов, специальных символов), текст приведен к нижнему регистру и лемматизирован с помощью библиотеки spaCy NLP [9,10]. Для создания векторного представления текстовых документов, которое является многомерным пространством, где каждый документ соответствует вектору, а координаты вектора отражают важность различных терминов в документе, был применен метод взвешивания на основе веса терм TF-IDF [11,12] с порогом максимальной частоты 0,7. В результате этих действий сформирована матрица терм-документов размерностью 2345×1878, где строки соответствуют документам, а столбцы – уникальным термам (словам). Анализ полученной матрицы терм-документов проведен на предыдущем этапе исследования и представлен в работе [7] вместе с детальным описанием методологии получения векторного пространства.

2.2. Сравнительный анализ моделей машинного обучения для прогнозирования причин отключений электроэнергии

В рамках данного исследования проведено сравнение эффективности трех распространенных алгоритмов машинного обучения в задаче классификации причин отключений:

- логистическая регрессия (Logistic Regression);
- алгоритм случайного леса (Random Forest Classifier);
- алгоритм градиентного бустинга LightGBM Classifier.

Для выбора оптимальных гиперпараметров и оценки обобщающей способности моделей был применен метод 5-кратной кросс-валидации с использованием поиска по сетке (GridSearchCV). При этом для обучения с учетом перекрестной проверки использовалось 90 % объектов векторного пространства, а 10 % – для проверки ее качества, причем разделение выборок производилось стратифицированно по целевому признаку.

Выбор лучшего классификатора производился на основе анализа следующих метрик качества предсказания:

- Точность (Accuracy): доля правильных предсказаний от общего числа объектов;
- Точность положительных предсказаний (Precision): доля правильных положительных предсказаний среди всех положительных предсказаний;
- Полнота (Recall): доля правильных положительных предсказаний среди всех фактических положительных предсказаний;
- F1-мера (F1-score): гармоническое среднее Precision и Recall.

Подробное описание метрик, использованных для оценки качества моделей, приведено в работе [13]. Учитывая многоклассовый характер решаемой задачи, для агрегирования результатов по всем классам были выбраны микро-(Weighted-) и макро(Macro)-усреднение. Макроусреднение предполагает расчет значения каждой метрики для каждого класса

Таблица 1. Метрики качества обученных моделей

Table 1. Quality metrics of trained models

ML модель	Accuracy	Precision weighted	Precision macro	Recall weighted	Recall macro	f1 weighted	f1 macro
Logistic Regression	0,913	0,9	0,615	0,913	0,576	0,904	0,583
LGBM Classifier	0,9	0,882	0,563	0,9	0,463	0,887	0,485
Random Forest Classifier	0,848	0,796	0,257	0,848	0,237	0,815	0,242
Dummy Classifier	0,521	0,272	0,029	0,521	0,056	0,357	0,039

независимо, а затем вычисление среднего арифметического этих значений. Такой подход обеспечивает равное влияние каждого класса на итоговую оценку модели. Микроусреднение, в свою очередь, учитывает дисбаланс классов в выборке, взвешивая вклад каждого класса пропорционально его представленности. Результаты оценки качества моделей, полученные с использованием указанных метрик, сведены в табл. 2. Для оценки значимости полученных результатов в таблицу включены значения метрик для базовой модели Dummy Classifier со стратегией «uniform», которая служит нижней границей качества и генерирует случайные предсказания с равной вероятностью для всех классов.

Анализ результатов, представленных в табл. 1, демонстрирует существенное превосходство всех обученных классификаторов над базовой моделью Dummy Classifier со стратегией «uniform». Наиболее высокое качество предсказаний по всем метрикам для задачи классификации причин отключений было получено на модели логистической регрессии. Оптимальные гиперпараметры модели включают балансировку классов, алгоритм оптимизации SAGA, регуляризацию ElasticNet с соотношением L1/L2 регуляризаторов 60/40 и коэффициентом регуляризации 14.5.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой точности предсказаний модели, превышающей 90 %. При этом ошибки классификации преимущественно связаны с классами, имеющими низкую частоту встречаемости в обучающей выборке. Данный вывод подкреплен резким снижением качества предсказания при выводе метрик с макроусреднением, не подразумевающего учет доли каждого класса в выборке.

2.3. Анализ качества классификации модели на тестовом наборе данных

Модель была проверена на независимом наборе данных (тестовая выборка размером 10 % от изначального, зарезервированная перед обучением классификаторов). Полученные результаты подтвердили стабильность модели: значения метрик качества на тестовом наборе оказались сопоставимы с результатами кросс-валидации. Точность (Accuracy) модели в 0.8638 и F1-мера с микроусреднением в 0.8663 свидетельствует о высокой вероятности правильной классификации новых данных. Однако анализ F1-меры с макроусреднением (0.5479) еще раз подтвердил, что модель испытывает трудности при классификации редких классов. Более подробный анализ качества классификации представлен в табл. 2 и на рис. 2. Табл. 2 содержит

Таблица 2. Детальные метрики качества классификации по причинам отключений (на уровне классов)

Table 2. Detailed metrics of the quality of classification by reasons for outages (at the class level)

Причина отключения	Precision	Recall	F1-score	Количество объектов
Атмосферные перенапряжения	1	1	1	1
Внутреннее повреждение АВ 0,4 кВ	0	0	0	1
Гололедно-ветровые нагрузки	0.333	0.333	0.333	3
Деятельность сторонних лиц	0	0	0	1
Другая причина	0	0	0	1
Жизнедеятельность животных и птиц	0.913	0.955	0.933	22
Окисление контактных соединений	1	1	1	1
Падение деревьев	0.808	0.750	0.778	28
Падение опоры	1	0.500	0.667	2
Перегорание предохранителя 0,4 кВ	0.786	0.846	0.815	26
Перекрытие проводов по постороннему предмету	0	0	0	1
Повреждение изолятора	0	0	0	1
Повреждение на оборудовании потребителя	0.250	0.500	0.333	2
Повреждение проводов и опор дорожной техникой и автомобилями	1	1	1	2
Превышение габарита стрелы провеса	0.500	1	0.667	1
Срабатывание АВ	0.958	0.935	0.947	123
Схлестывание проводов	0.842	0.842	0.842	19
Макроусреднение	0.552	0.568	0.548	235
Микроусреднение	0.872	0.864	0.866	235

детальный отчет о точности положительных предсказаний, полноте и F1-мере для каждого класса (причин отключений электроэнергии). На рис. 2 представлена матрица ошибок (неточностей) в виде тепловой карты, визуализирующей распределение ошибок классификации, что позволяет идентифицировать наиболее проблемные классы для прогнозирования моделью.

3. Обсуждение

3.1. Анализ факторов, влияющих на ошибки классификации

Несмотря на то что автоматическая оценка точности дает нам общее представление о качестве работы классификатора, ручной анализ ошибок позволяет погрузиться в детали и выявить конкретные причины неверных предсказаний. Такой подход обеспечивает более глубокое понимание ограничений модели и помогает разработать стратегии для улучшения ее производительности. В табл. 3 приведены десять записей (сохраненных в исходном виде) о ходе устранения отключений электроэнергии, для которых модель отметила ошибочный класс. Анализ этих данных выявил существенную проблему, связанную с качеством заполнения журнала учета аварийных и плановых отключений: большое количество орфографических ошибок и опечаток. Например, в третьем примере табл. 3 присутствует термин «Обнаруженоборванный», не распознанный классификатором из-за орфографической ошибки. При этом в седьмом

Таблица 3. Анализ ошибок модели автоматической классификации причин отключения электроэнергии

Table 3. Error analysis of the automatic classification model for the causes of power outages

№	Текстовая информация	Истинный класс	Предсказанный класс
	01.04.2018 01:40 заявка нет ЭЭ01.04.2018 02:30 обнаружен поврежденный а.в.0,4кВ в РУ-0,4кВ01.04.2018 11:50 заменен а.в.0,4кВ в РУ-0,4кВ, ВЛ-0,4кВ № 2 в работе	Внутреннее повреждение АВ 0,4 кВ	Перегорание предохранителя 0,4 кВ
	21.05.2018 21:30 сообщение из н.п. Свапские дворы об отсутствии э/э.21.05.2018 22:03 перегорел ПН-2 ф "С"21.05.2018 22:34 ВЛ введена в работу после осмотра. Возможное касаниеветвей деревьев проводов в прол. оп.№№ 2/2–2/4 при ветре.	Гололедно-ветровые нагрузки	Падение деревьев
	16:18 Обнаружен отключенный АВ-0,4кВ № 3 ТП № 33. 16:39 Обнаруженооборванный ввод в нежилое здание. 16:47 Произведено оключение перекидкиот оп.№ 5. 16:55 Включен АВ-0,4 кВ № 3 ТП № 33	Обрыв провода	Срабатывание АВ
	14:52 Поступил сигнал об отсутствии эл.энергии.15:47 При осмотре ТП, обнаружено, отключен АВ-0,4кВ № 2.15:50 Бригада направлена на обход. 15:56 оп-30–33 провис проводов.	Срабатывание АВ	Превышение габарита стрелы провеса
	11.04.2019 22:08 поступила заявка нет эл.энергии.12.04.2019 01:08 осмотрена ВЛ-0,4кВ ф-1.В пролете опор № 6-№ 7 веткадерева упала на провода, схлест проводов. 02:28 устранено повреждение	Падение деревьев	Схлестывание проводов
	Перегоревший ПН-2 фазы "А". Схлест проводов А-25 в пролете опор № 14–15из-за наличия поросли в проводах.	Падение деревьев	Схлестывание проводов
	06.06.2018 09:50 Позвонил абонент нет ээ.16:50 Обнаружено обрыв провода в пролете опор № 1/1–1/2 из-за ветвейдеревьев.17:50 Устранено	Падение деревьев	Обрыв провода
	Откл. АВ-0,4 кВ. Механическое повреждение перекидки провода СИП-4 16 опоры № 2 до здания (магазин).	Перекрытие проводов по постороннему предмету	Другая причин
	Отключен АВ-0,4кВ ф-1. Схлест проводов в пролете опор2–3 отп-1, соскочили изоляторы с оп 2,3 отп-1 из внеохранной зоны упало дерево впролете опор 3–4 отп-1	Повреждение изолятора	Падение деревьев
	16–26 прибывшая бригада обнаружила, что отключен АВ-0,4кВ Ф№ 2, местныежители спили на ВЛ-0,4кВ дерево из внеохранной зоны, оборваны провода впролете опор№ 4–6	Деятельность сторонних лиц	Падение деревьев

лятора» или «падение деревьев»), 10 («деятельность сторонних лиц» или «падение деревьев»). Указанная проблема свидетельствует о необходимости дальнейшего совершенствования системы классификации с целью повышения ее точности и информативности.

Еще один момент, который необходимо отметить, что из-за наличия человеческого фактора присутствуют ошибки при ручной классификации причин отключений электроэнергии. В приведенных примерах (4 и 2) отчетливо прослеживается подобная тенденция. Например,

в примере 4, несмотря на указание о превышении габарита стрелы провеса, персонал классифицировал аварию как «Срабатывание АВ». Аналогично в примере 2 отсутствие информации о гололедно-ветровых нагрузках ставит под сомнение обоснованность такой классификации, особенно в сравнении с выводом модели о падении деревьев.

3.2. Направления будущих исследований

Результаты проведенного исследования демонстрируют возможность достижения высокой точности классификации причин отключений электроэнергии при использовании классических моделей машинного обучения в сочетании с представлением текстовых данных в виде матрицы «терм-документ». Данный результат обусловлен тем, что текстовые фрагменты, описывающие процесс устранения аварийных отключений, как правило, содержат термины, непосредственно указывающие на причину отключения электроэнергии, что снижает необходимость анализа семантических связей между словами.

Наряду с достигнутыми в исследовании результатами существуют перспективы дальнейшего улучшения классификации причин отключения электроэнергии, которые условно можно разделить на две группы. Первая группа включает исследования, ориентированные на улучшение качества исходных данных, вторая – на применение более совершенных методов машинного обучения. В рамках первой группы целесообразно рассмотреть следующие аспекты: устранение дисбаланса классов целевой переменной посредством увеличения объема выборки; совершенствование структуры классификации причин отключений электроэнергии в электрических сетях 0,4 кВ; повышение качества первичных данных, включая коррекцию орфографических и типографических ошибок на этапе внесения информации в журнал учета аварийных и плановых отключений. Вторая группа включает автоматическую орфографическую коррекцию текста и использование эмбедингов, в том числе предварительно обученных, для представления текстовых документов в векторном пространстве, что позволит учитывать семантические связи в текстах. Реализация обоих подходов предполагает применение более сложных моделей машинного обучения, основанных на глубоких нейронных сетях, что может потребовать использования высокопроизводительного оборудования или привлечения платных облачных вычислительных ресурсов, включая сервисы больших языковых моделей. Следует отметить, что повышение качества классификации исключительно за счет методов второй группы будет ограниченным, поскольку качество входных данных является определяющим фактором для задач машинного обучения.

В заключение важно отметить, что полученные результаты не подтвердили нашу эмпирическую гипотезу о превосходстве точности автоматической классификации отключений электроэнергии над ручной. Ручной анализ ошибок модели показал, что значительная часть неверных классификаций связана с наличием орфографических и типографических ошибок в исходных данных. Это позволяет предположить, что при устранении этих ошибок точность модели существенно возрастет и подтвердится исходная гипотеза.

Выводы

Основным результатом данного исследования является подтверждение возможности применения методов машинного обучения для автоматической идентификации причин аварий

на основе текстовой информации об устранении отключений электроэнергии, содержащейся в журнале учета аварийных и плановых отключений. Показано, что применение классических моделей машинного обучения, таких как логистическая регрессия, случайный лес, градиентный бустинг, реализованный в библиотеке LightGBM, к векторному представлению текстовых документов, полученному методом TF-IDF, обеспечивает высокие показатели качества классификации. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности предложенного подхода. Точность классификации для исследованных моделей варьировалась в диапазоне от 0,848 до 0,913, что существенно превышает точность базовой модели со стратегией «uniform» (0,521). Наилучшие результаты достигнуты с помощью модели логистической регрессии, продемонстрировавшей точность 0,864 и F1-меру с микроусреднением 0,866 на независимой тестовой выборке. При этом все исследованные модели демонстрируют снижение качества классификации редких классов, что проявляется в уменьшении значений метрик при усреднении без учета доли классов. В связи с этим определена необходимость увеличения объема выборки для повышения представленности редких классов и решения проблемы их дисбаланса, а также коррекции орфографических и типографических ошибок в записях журнала учета аварийных и плановых отключений как на этапе внесения самих записей, так и с помощью методов автоматической коррекции. Кроме того, обоснована необходимость совершенствования структуры классификации причин отключений электроэнергии в электрических сетях 0,4 кВ, и предложено дальнейшее исследование с применением более совершенных методов обработки естественного языка, таких как использование эмбедингов текстовых документов и моделей глубокого обучения.

Список литературы / References

- [1] Зоидов К.Х., Урунов А. А., Богатырев С. И., Остапенко В. А. Дефицит кадров: сравнительный анализ в России и зарубежных странах. *Региональные проблемы преобразования экономики*. 2024, 6, 164–172 [Zoidov K. Kh., Urunov A. A., Bogatyrev S. I., Ostapenko V. A. Personnel shortage: comparative analysis in Russia and foreign countries. *Regional'nyye problemy preobrazovaniya ekonomiki* (in Russian) DOI: 10.26726/1812–7096–2024–6–164–172]
- [2] Андреев К.Д., Демьянова А. В., Лола И. С., Покровский С. И., Рябова А. Д., Усов Н. А. *Рынок труда отдельных отраслей экономики России: текущая ситуация и ожидаемый фокус перемен. II квартал 2024 года*. Москва: ИСИЭЗ ВШЭ, 2024. 69 с. [Andreev K. D., Demyanova A. V., Lola I. S., Pokrovsky S. I., Ryabova A. D., Usov N. A. *The labor market of individual sectors of the Russian economy: current situation and expected focus of changes. The II quarter of 2024*. Moscow: ISSEK HSE, 2024. 69 p. (in Russian)]
- [3] Емелина Н.К., Рожкова К. В., Рошин С. Ю., Солнцев С. А., Травкин П. В. *Выпускники высшего образования на российском рынке труда: тренды и вызовы*. Москва: Изд-во НИУ ВШЭ, 2022. 160 с. [Emelina N. K., Rozhkova K. V., Roshchin S. Yu., Solntsev S. A., Travkin P. V. *Higher Education Graduates in the Russian Labor Market: Trends and Challenges*. Moscow: HSE Publishing House, 2022. 160 p. (in Russian) EDN: FKUTTF]
- [4] Виноградова А.В. Причины отключений в сельских электрических сетях и их структурирование. *Агротехника и энергообеспечение*, 2024, 4(45), 12–19 [Vinogradova A. V. Causes of outages in rural electrical networks and their structuring. *Agrotekhnika i energoobespecheniye*. 2024, 4(45), 12–19 (in Russian) EDN: FYMIMZ]

[5] Комаров М. Ю. Оценка технического состояния и уровня эксплуатации оборудования предприятий распределительного комплекса дальневосточного региона на основе статистического анализа отключений энергетического оборудования. *Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов*. 2013. С. 318–322 [Komarov M. Yu. Assessment of the technical condition and level of operation of equipment of distribution complex enterprises of the Far Eastern region based on statistical analysis of power equipment outages. *Power engineering: management, quality and efficiency of energy resource use*. 2013. Pp. 318–322. (in Russian) EDN: SAJQVP]

[6] Коннов А. А. Анализ аварийности в электрических сетях 0, 4 кВ Нижегородской области. *Актуальные научные исследования в современном мире*, 2020, 5–1, 127–130 [Konnov A. A. Analysis of accidents in 0.4 kV electrical networks of the Nizhny Novgorod region. *Aktual'nyye nauchnyye issledovaniya v sovremennoy mire*, 2020, 5–1, 127–130 (in Russian) EDN: VLTBDM]

[7] Большев В. Е. Анализ текстовой информации об устранении отключений в сельских электросетях 0,4 кВ с использованием латентно-семантического анализа и кластеризации. *Известия НВ АУК*. 2025, 3(81), 479–493 [Bolshev V. E. The analysis of the textual information on elimination of outages in 0.4 kV rural power networks using latent semantic analysis and clustering. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2025. 3(81). 479–493 (in Russian). DOI: 10.32786/2071–9485–2025–03–54]

[8] Сковпин Н. С., Паринов М. В. Предварительная обработка и масштабирование данных для последующего применения машинного обучения. *Инновации в науке и практике*. 2018. С. 197–203 [Skovpin N. S., Parinov M. V. Pre-processing and scaling of data for subsequent application of machine learning. *Innovatsii v nauke i praktike*. 2018. Pp. 197–203 (in Russian)]

[9] Васильев Ю. *Обработка естественного языка. Python и spaCy на практике*. СПб.: Питер, 2021. 256 с. [Vasiliev Yu. *Natural Language Processing. Python and spaCy in Practice*. St. Petersburg: Piter, 2021. 256 p. (in Russian)]

[10] Жердева М. В., Артюшенко В. М. Стемминг и лемматизация в lucene. Net. *Лесной вестник*, 2016, 20(3), 131–134 [Zherdeva M. V., Artyushenko V. M. Stemming and lemmatization in lucene. Net. *Lesnoy Vestnik*, 2016, 20(3), 131–134. EDN: WKNMTN (in Russian)]

[11] Pimpalkar A. P., Raj R. J. R. Influence of pre-processing strategies on the performance of ML classifiers exploiting TF-IDF and BOW features. *ADCAIJ: Advances in Distributed Computing and Artificial Intelligence Journal*, 2020, 9(2), 49–68.

[12] Большакова Е. И., Воронцов К. В., Ефремова Н. Э., Клышинский Э. С., Лукашевич Н. В., Сапин А. С. *Автоматическая обработка текстов на естественном языке и анализ данных*. М.: Изд-во НИУ ВШЭ, 2017. 269 с. [Bolshakova E. I., Vorontsov K. V., Efremova N. E., Klyshinsky E. S., Lukashevich N. V., Sapin A. S. *Automatic processing of texts in natural language and data analysis*. М.: HSE Publishing House, 2017. 269 p. EDN: VSCJGB (in Russian)]

[13] Bol'shev V., Budnikov D., Dzeikalo A., Korolev R. Power Outage Prediction on Overhead Power Lines on the Basis of Their Technical Parameters: Machine Learning Approach. *Energies*, 2025, 18(18), 5034. DOI: 10.3390/en18185034

Памяти доктора технических наук, профессора Лещинской Т.Б.



17 мая 2026 года ушла из жизни ЛЕЩИНСКАЯ ТАМАРА БОРИСОВНА, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, лауреат премии правительства РФ в области образования.

Тамара Борисовна родилась 24 июня 1942 года в Москве и большую часть жизни посвятила науке и образованию в сфере электрификации сельского хозяйства. Окончила в 1964 году Московский институт инженеров сельскохозяйственного производства, (МИИСП, после переименованный в МГАУ им. В. П. Горячкина, а ныне РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева), факультет электрификации и автоматизации сельского хозяйства.

Работала техником, затем инженером в научно-исследовательском и проектно-институте «Сельэнергопроект» (1963–1968), затем поступила в аспирантуру МИИСП, начала работать там же старшим преподавателем. Кандидатскую диссертацию «Электрификация районов орошаемого хлопководства на повышенной частоте» защитила в 1972 году в диссертационном совете при МИИСП. Получила звание доцента и работала доцентом (1972–1990).

Докторскую диссертацию «Методы выбора стратегий развития систем электроснабжения сельских районов» защитила в 1990 году под руководством доктора технических наук, профессора М. С. Левина в диссертационном совете на базе Всесоюзного научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ). В 1992 году получила звание профессора. С 1991 (по другим данным с 1988 г.) по 2014 г. – заведующая кафедрой «Электроснабжение и электрические машины» МГАУ им. В. П. Горячкина, а с 2014 по 2025 год – профессор кафедры.

Под руководством Лещинской Т. Б. разработано программное обеспечение для расчета технико-экономических параметров систем электроснабжения напряжением 10–110 кВ. Это программно-вычислительный комплекс сетевого имитационного моделирования и анализа (ПРОКСИМА); экспертная система оценки качества функционирования системы электроснабжения (ЭСОК), экспертная система оценки надежности (ЭСОН) сельскохозяйственных потребителей по многокритериальной модели, которые внедрены в проектной организации ОАО «РОСЭП», в 35 энергосистемах страны. ПВК «РАПН» – для расчета показателей надежности потребителей и выбора средств надежности, а также имитации действия оперативно-выездной бригады. Перечисленные программные комплексы широко используются в учебном процессе РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева, Орловском ГАУ, Рязанской ГСХА, Марийском государственном университете (энергетический факультет) при разработке курсовых и дипломных проектов.

Обосновала и развила новое научное направление многокритериальной оптимизации параметров систем электроснабжения с учетом неопределенности части исходной информации в электроснабжении сельского хозяйства.

Тамара Борисовна подготовила более 30 кандидатов и двух докторов технических наук. Опубликовала более 35 учебников, учебных и методических пособий, монографий по тематикам, связанным с электроснабжением сельского хозяйства. Является соавтором учебника «Электроснабжение сельского хозяйства», выдержавшего целый ряд переизданий. Первая часть новой редакции учебника с участием Тамары Борисовны увидела свет в 2025 году, вторая часть выйдет в 2026 году. Лещинская Т. Б. являлась действительным членом международной академии аграрного образования (1997 г.) и международной энергетической академии (1995 г.).

Работая в МГАУ имени В. П. Горячкина и в МЭИ, разработала авторские лекционные курсы по различным дисциплинам. Неоднократно была председателем государственных экзаменационных и аттестационных комиссий в разных вузах нашей страны, в том числе в Орловском ГАУ. Сотрудничала с вузами, в частности с Иркутским ГАУ, в рамках подготовки научных и образовательных проектов. В 1995 году Тамаре Борисовне было присвоено звание Заслуженного деятеля науки и техники, а в 2008 году она стала Лауреатом премии правительства РФ в области образования. Награждена (2015 год) золотой медалью имени академика И. А. Будзко, присуждаемой сельскохозяйственным отделением Российской академии наук (ранее Российской академией сельскохозяйственных наук) за выдающиеся работы в области энергетики, электрификации, автоматизации.

Коллективы кафедры электроснабжения и теплоэнергетики имени академика И. А. Будзко и всего института механики и энергетики имени В. П. Горячкина РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева, кафедры «Электроснабжение» Орловского ГАУ, кафедры электроснабжения и электро-техники Иркутского ГАУ им. А. А. Ежовского приносят искренние глубокие соболезнования родным и близким Тамары Борисовны!

СВЕТЛАЯ ПАМЯТЬ ТАМАРЕ БОРИСОВНЕ, СВЕТЛОМУ И ИСКРЕННЕМУ ЧЕЛОВЕКУ,
БОЛЬШОМУ УЧЁНОМУ В СФЕРЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА!

*От коллективов кафедр электроснабжения РГАУ-
МСХА имени К. А. Тимирязева, Орловского ГАУ и Ир-
кутского ГАУ д.т.н., доцент Виноградов А. В., д.т.н.
профессор Наумов И. В. и к.т.н., доцент Белов С. И.*