

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

**Журнал Сибирского
федерального университета
Техника и технологии**

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

2026 19 (1)

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

2026 19(1)

Журнал Сибирского федерального университета Техника и технологии

Journal of Siberian Federal University Engineering & Technologies

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.**

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

Главный редактор: *В.А. Кулагин*. Редактор *А.В. Прохоренко*.
Корректор *Т.Е. Бастрыгина*. Компьютерная верстка *Е.В. Гревцовой*

№ 1. 26.02.2026. Индекс: 42328. Тираж: 1000 экз.

Свободная цена

Адрес редакции и издательства:
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 13.02.2026. Формат 60x90/8. Усл. печ. л. 11,2.
Уч.-изд. л. 10,7. Бумага тип. Печать офсетная. Тираж 1000 экз. Заказ № 25977.

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 0000-0001-6165-6474;
- 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, Corresponding member 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

Viktor R. Vedruchenko and Aleksandr B. Bashurov

Evaluation of the Heat Output of Three-Component Coal-Water Fuel (Cwf) for Boiler Units..... 6

**Aital E. Markov, Afanasii A. Dyakonov, Aleksei G. Tuisov,
Aitalina A. Okhlopkova, Aleksandr M. Spiridonov,
Anatoliy K. Kychkin and Aisen A. Kychkin**

The Surface Treatment Effect of High-Modulus Fabrics on the Physical
and Mechanical Properties of Reinforced Elastomers in Various Environments..... 16

**Chzhen Guankhua, Dmitriy A. Uglanov, Lyu Tszuyunze,
Ilya F. Leykovskiy, Artem A. Shimanov,
Viktor V. Uralapkin and Natalya V. Galkina**

Intensification of Heat Transfer by Optimizing the Geometric Parameters of the Fins
in the Cooling Channels of the Turbine Blades 25

Valentin D. Pavlov

The Main Fragment of the Own Magnetic Field of Magnetic Systems of Electrical Devices
Is the Spin Magnetic Flux 42

**Andrey V. Kryukov, Konstantin V. Suslov, Dmitrij A. Seredkin,
Ekaterina V. Voronina and Andrey G. Batukhtin**

Modeling of Electromagnetic Fields of a Gas-Insulated Line Supplying Traction Substations 49

**Maksim G. Merenkov, Yuriy N. Bezborodov,
Roman G. Shaidurov and Aleksander N. Sokolnikov**

Analysis of Magistral Pipeline Defectoscopy Methods and Their Development Prospects 64

Math Modeling. Numerical Experiment

**Maria A. Lukanina, Vladimir A. Popov,
Alekcander V. Lapin and Vladimir I. Lazarev**

Numerical Simulation of the Basalt Melt Flow Through the Feeder Tray of Gas-Electric Furnace 78

Nail F. Kashapov,

Lenar N. Kashapov and Violletta Yu. Chebakova

Algorithm for Calculating the Optimization of the Parameters for the Electroextraction
of Metal Based on the Example of Zinc 92

Information and Communication Technologies

**Evgeny N. Garin, Andrey B. Gladyshev, Nikita V. Kopylov,
Vasily N. Ratushnyak and Elizabeth A. Nechaeva**

Analysis of Modern Methods for Recognizing Small Aerial Objects Based
on Machine Learning 108

Artem P. Kopytov and Denis A. Kuzin

Machine Learning Methods for Solving Fire Detection Problems 126

СОДЕРЖАНИЕ

Исследования. Проектирование. Опыт эксплуатации

В. Р. Ведрученко, А. Б. Башуров

Оценка жаропрочности трёхкомпонентного водоугольного топлива (ВУТ) для котельных агрегатов..... 6

**А. Е. Марков, А. А. Дьяконов,
А. Г. Туисов, А. А. Охлопкова,
А. М. Спиридонов, А. К. Кычкин, А. А. Кычкин**

Влияние поверхностной обработки высокомодульных тканей на физико-механические свойства армированных эластомеров в различных средах..... 16

**Чжэн Гуанхуа, Д. А. Угланов,
Лю Цзюньцзе, И. Ф. Лейковский,
А. А. Шиманов, В. В. Урлапкин, Н. В. Галкина**

Интенсификация теплообмена за счет оптимизации геометрических параметров ребер в каналах охлаждения лопаток турбин..... 25

В. Д. Павлов

Основной фрагмент собственного магнитного поля магнитных систем электротехнических устройств – спиновый магнитный поток 42

**А. В. Крюков, К. В. Суслов,
Д. А. Середкин, Е. В. Воронина, А. Г. Батухтин**

Моделирование электромагнитных полей газоизолированной линии, питающей тяговые подстанции 49

**М. Г. Меренков, Ю. Н. Безбородов,
Р. Г. Шайдуров, А. Н. Сокольников**

Анализ методов дефектоскопии магистральных трубопроводов и перспективы их развития..... 64

Математическое моделирование. Численный эксперимент

М. А. Луканина, В. А. Попов, А. В. Лапин, В. И. Лазарев

Компьютерное моделирование узла выдачи расплава базальта из газозащитной вагранки 78

Н. Ф. Кашапов, Л. Н. Кашапов, В. Ю. Чебакова

Алгоритм оптимизации параметров для электроэкстракции металла на примере цинка 92

Информационно-коммуникационные технологии

**Е. Н. Гарин, А. Б. Гладышев,
Н. В. Копылов, В. Н. Ратушняк, Е. А. Нечаева**

Анализ современных методов распознавания малоразмерных воздушных объектов на основе машинного обучения 108

А. П. Копытов, Д. А. Кузин

Методы машинного обучения для решения задач по определению очагов возгорания..... 126

**Researching. Design.
Operating Experience**

**Исследования.
Проектирование.
Опыт эксплуатации**



EDN: RQGETD

УДК 536.468

Evaluation of the Heat Output of Three-Component Coal-Water Fuel (Cwf) for Boiler Units

Viktor R. Vedruchenko* and Aleksandr B. Bashurov
Omsk State Transport University
Omsk, Russian Federation

Received 16.10.2025, received in revised form 08.11.2025, accepted 13.01.2026

Abstract. This paper proposes an analytical and empirical method for assessing the heating performance of a three-component coal-water fuel containing a dispersed coal fraction, water, and liquid fuel (fuel oil) as an energy carrier additive to improve flammability. The paper examines heat release, product temperature, combustion coefficients, and combustion dynamics. Formulas are derived for calculating the specific heat, the conversion factor to effective thermal power, and the combustion rate. Model calculations are performed, and graphs of the heating performance versus fuel composition are constructed.

Keywords: coal-water fuel, fuel oil, combustion kinetics, heating performance, boiler units.

Citation: Vedruchenko V. R., Bashurov A. B. Evaluation of the Heat Output of Three-Component Coal-Water Fuel (Cwf) for Boiler Units. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2026, 19(1), 6–15. EDN: RQGETD



Оценка жаропроизводительности трёхкомпонентного водоугольного топлива (ВУТ) для котельных агрегатов

В. Р. Ведрученко, А. Б. Башуров

*Омский государственный университет путей сообщения
Российская Федерация, Омск*

Аннотация. В работе предлагается аналитически-эмпирическая методика оценки жаропроизводительности трёхкомпонентного водоугольного топлива, содержащего угольную дисперсную фракцию, воду и жидкое топливо (мазут) в качестве энергоносителя-добавки для улучшения воспламеняемости. Рассматриваются зависимости тепловыделения, температура продуктов, коэффициенты сгорания и динамика горения. Получены формулы для расчёта удельной теплоты, коэффициента пересчёта на эффективную тепловую мощность и скорости горения. Проведены модельные расчёты и построены графики зависимости тепловой мощности от состава топлива.

Ключевые слова: водоугольное топливо, мазут, кинетика горения, жаропроизводительность, котельные агрегаты.

Цитирование: Ведрученко В. Р. Оценка жаропроизводительности трёхкомпонентного водоугольного топлива (ВУТ) для котельных агрегатов / В. Р. Ведрученко, А. Б. Башуров // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(1). С. 6–15. EDN: RQGETD

Введение

Трёхкомпонентные смеси рассматриваются в качестве альтернативных топлив, поскольку позволяют комбинировать преимущества угля (низкая стоимость) и жидких компонентов (улучшенная распыляемость, управляемость).

Трёхкомпонентное водоугольное топливо (ВУТ) представляет собой дисперсную суспензию, содержащую угольный шлам или мелкодисперсный уголь, воду и добавки (поверхностно-активные вещества, мазут, отработанные масла и т.п.). Мазут служит энергокомпонентом и улучшает смачиваемость и распыление угольной суспензии; вода же необходима для транспортных и реологических свойств, но снижает удельную теплосодержательность из-за затрат на нагрев и испарение. ВУТ становится перспективной альтернативой традиционному углю и мазуту для котельных агрегатов, особенно на малых и средних ТЭС и котельных, благодаря более экологичному сгоранию, снижению выбросов и возможности утилизации отходов углеобогащения [1–6].

В литературе известны работы по трёхкомпонентным топливам, однако большинство исследований касаются или двухкомпонентных систем (уголь – вода или уголь – мазут), или только показателей горения (время зажигания, скорость горения), без системной теплотехнической оценки [1–9].

Цель оценки

Построение модели теплового баланса и кинетики горения для смеси с заданными долями угля, воды и мазута, анализ жаропроизводительности для котельных агрегатов. Определение жаропроизводительности ВУТ, т.е. тепловой мощности, выделяемой при его сжигании, важно

для расчёта эффективности котельных агрегатов; выбора режимов подачи и сжигания; оценки целесообразности замены традиционных видов топлива.

1. Определение жаропроизводительности (низшей теплоты сгорания)

Оценка жаропроизводительности трехкомпонентного водоугольного топлива (ВУТ), состоящего из угля, воды и мазута, представляет собой важный этап при проектировании и эксплуатации котельных агрегатов. Такое топливо относится к классу водоугольных суспензий (ВУС), и его применение позволяет использовать низкосортные угли и отходы переработки угля, а также уменьшить выбросы вредных веществ при сжигании [3–6].

Для расчета низшей теплоты сгорания твёрдого и жидкого топлива пользуются формулой Д. И. Менделеева, кДж/кг:

$$Q_n = 339 C^p + 1030 H^p - 109(O^p - S^p) - 25 W^p, \quad (1)$$

где, C^p , H^p , O^p , S^p , W^p – рабочий элементарный состав топлива, %.

Низшая теплота сгорания компонентов ВУТ приведена в табл. 1.

Жаропроизводительность наряду с теплотой сгорания является одним из важнейших энергетических показателей качества топлива, позволяющим оценить, насколько эффективно можно использовать данное топливо для высокотемпературного процесса. Жаропроизводительность топлива определяется по формуле, °С [7–10]:

$$t_{max} = t_{ж} = \frac{Q_n}{V_r^0 c_r'}, \quad (2)$$

где V_r^0 – объем неразбавленных продуктов сгорания, т.е. объем дымовых газов, образовавшихся при полном сгорании 1 кг топлива и $\alpha = 1$, м³/кг;

c_r' – теплоемкость продуктов сгорания, кДж/(м³ °С).

При высокой температуре происходит эндотермический процесс диссоциации CO₂ и H₂O, вследствие чего жаропроизводительность топлива и температура сгорания несколько снижаются.

Уравнение теоретической (расчетной) температуры с учетом диссоциации принимает следующий вид, °С:

$$t_p = \frac{H_r - q_{дис}}{V_r^0 c_r'}, \quad (3)$$

где $q_{дис}$ – теплота, затрачиваемая на диссоциацию газов при сжигании 1 кг топлива.

Таблица 1. Низшая теплота сгорания компонентов ВУТ

Table 1. Lower calorific value of VUT components

Компонент	Низшая теплота сгорания Q_n , МДж/кг	Примечание
Уголь	12–28	Зависит от марки и зольности
Мазут (М100)	39–41	Высококалорийный компонент
Вода	0	Инертный компонент

В топках котельных агрегатов при температуре ниже 1700 °С диссоциацией пренебрегают. В этом случае калориметрическую и теоретическую температуры отождествляют.

Действительная температура рабочего пространства топки меньше калориметрической и определяется по выражению, °С:

$$t_r = \eta_n t_k, \quad (4)$$

где η_n – пирометрический КПД топки, учитывающий потери тепла вследствие неполного сгорания, $\eta_n = 0,6 - 0,85$.

Среднюю температуру факела можно определить по формуле, К:

$$T_\phi = \sqrt[4]{T_p^2 T_b^2}, \quad (5)$$

где T_p и T_b – теоретическая температура и температура на выходе из топки соответственно.

Для определения значений V_0 и V_r только по теплоте сгорания топлива $Q_n^{буг}$ и по его влажности W^p применим ряд упрощенных формул С.Г. Тройба, основанных на большом числе опытов и аналитических расчетов, не требующих данных об элементарном составе топлива [5–10].

Теоретическое количество воздуха, м³/кг:

$$V_0 = \frac{Q_n}{1000} + 0,007W^p - 0,06. \quad (6)$$

Количество неразбавленных продуктов сгорания ($\alpha = 1$), м³/кг:

$$V_r^0 = V_0 + \Delta V. \quad (7)$$

Количество продуктов сгорания при заданном коэффициенте избытка воздуха α , м³/кг:

$$V_r^0 = \alpha V_0 + \Delta V, \quad (8)$$

где ΔV – приращение объема продуктов сгорания по сравнению с объемом воздуха (разность между объемом продуктов сгорания и объемом воздуха при нормальных условиях), м³/кг;

$$\Delta V = 0,12 \frac{Q_n}{4,18 \cdot 10^3} - 0,48. \quad (9)$$

Теоретическую температуру горения можно определить по формуле, °С:

$$t_p = \frac{H_r - q_{дис}}{V_r^0 c'_r + (\alpha - 1)V_0 c'_b}, \quad (10)$$

где V_r^0 – объем неразбавленных продуктов сгорания при α , м³/кг; $(\alpha - 1)V_0$ – объем избыточного (разбавляющего) воздуха, м³/кг; c'_r и c'_b – средние объемные теплоемкости продуктов сгорания и воздуха при постоянном давлении, кДж/(м³ °С).

Значения теплоемкостей воздуха c'_b и неразбавленных продуктов сгорания c'_r , образовавшихся при полном сгорании топлива, приведены в табл. 2.

2. Приближенная методика расчета горения ВУТ

2.1. Определяем низшую теплоту сгорания ВУТ, МДж/кг

Элементарный состав трехкомпонентного водоугольного топлива приведен в табл. 3 на основании используемого топлива омских ТЭЦ: уголь Экибастузского бассейна (марка КСН) и мазута марки (М100).

Таблица 2. Теплоемкость воздуха и неразбавленных продуктов сгорания

Table 2. Heat capacity of air and undiluted combustion products

Температура, °С	Теплоемкость, кДж/(м ³ °С)		Температура, °С	Теплоемкость, кДж/(м ³ °С)	
	Воздуха $c'_в$	Продуктов сгорания $c'_г$		Воздуха $c'_в$	Продуктов сгорания $c'_г$
0–200	1,30	1,38	1000–1200	1,42	1,55
200–400	1,30	1,42	1200–1500	1,46	1,59
400–700	1,34	1,46	1500–1800	1,47	1,63
700–1000	1,38	1,50	1800–2100	1,50	1,67

Таблица 3. Элементарный состав Экибастузского каменного угля и мазута марки М100

Table 3. Elemental composition of Ekibastuz coal and fuel oil grade M100

Топливо	C^p	H^p	O^p	N^p	S^p	W^p	A^p	V^p	Теплота сгорания Q_n^p , МДж/кг
Уголь	41,1	2,8	6,6	0,8	0,8	7	40,9	32	16,956
Мазут	86	11	0,8	0,3	2	0,5	-	-	40,6

Рабочая масса топлива равна

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S^p + W^p + A^p + V^p = 100 \%. \quad (11)$$

Оптимальный состав ВУТ: уголь 60–75 %, мазут 5–15 %, вода 15–30 %.

Оптимальное соотношение компонентов ВУТ и низшая теплота сгорания представлены в табл. 4.

При производстве ВУТ происходит изменение элементного состава твердого и жидкого топлива на измененную рабочую влажность $W_{вут}^p$, вследствие чего необходимо пересчитать элементный состав нормативного топлива путем умножения на коэффициент K :

$$K = \frac{100 - W_{вут}^p}{100 - W_{норм}^p}, \quad (12)$$

где $W_{вут}^p$ и $W_{норм}^p$ – измененная (ВУТ) и нормативная влажность топлива соответственно, %.

Низшая теплота сгорания рабочей массы топлива с нормативной влажностью $W_{норм}^p$ пересчитывается на трехкомпонентное топливо влажностью $W_{вут}^p$ по формуле

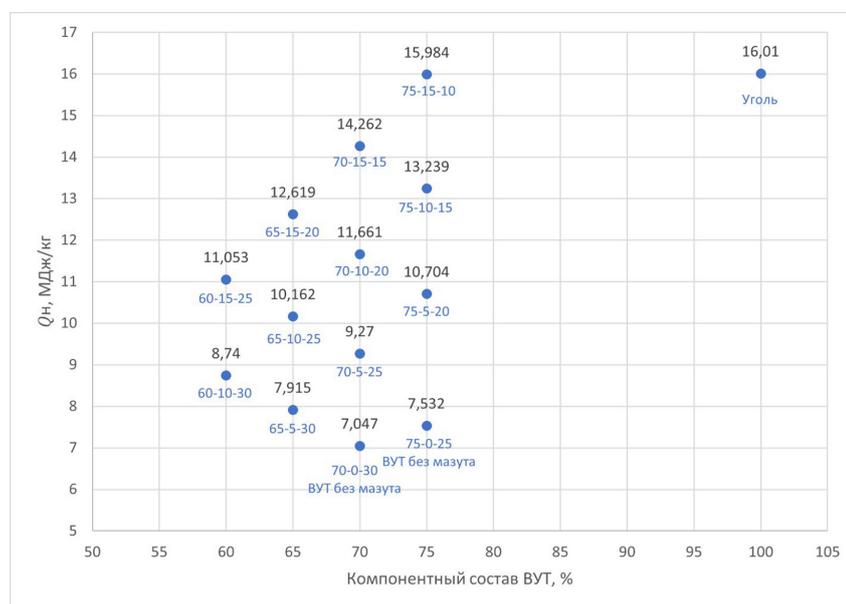
$$Q_n^{вут} = (Q_n + 24,42W_{норм}^p) \frac{100 - W_{вут}^p}{100 - W_{норм}^p} - 24,42W_{вут}^p. \quad (13)$$

Измененная влажность топлива $W_{вут}^p$ принимается путем суммирования входящих в состав ВУТ компонентов: уголь, мазут, вода. Уголь КСН – общая влага в рабочем состоянии топлива $W_{норм.уг.}^p = 7 \%$, для мазута марки М-100 в нормативе (ГОСТ 10585–2013 «Топливо мазутное») установлено требование по содержанию воды: массовая доля воды (влажность) не более 1,0 %. При правильном хранении фактическая влажность мазута М-100 составляет 0,2–0,5 %, принимаем $W_{норм.маз.}^p = 0,5 \%$.

Таблица 4. Оптимальное соотношение компонентов ВУТ

Table 4. Optimal ratio of VUT components

Соотношение ВУТ уголь-мазут-вода, %	Углерод (С ^P), %	Водород (H ^P), %	Кислород (O ^P), %	Сера (S ^P), %	Азот (N ^P), %	Влажность топлива $W_{\text{вут}}^P$, %	Низшая тепло- та сгорания $Q_{\text{н}}^{\text{ВУТ}}$, МДж/кг
60–10–30	33,26	6,11	30,71	0,68	0,51	37,5	8,74
60–15–25	37,56	6,105	26,305	0,78	0,525	32,5	11,053
65–5–30	31,015	5,7	31	0,62	0,535	37,5	7,915
65–10–25	35,315	5,695	26,595	0,72	0,55	32,5	10,162
65–15–20	39,615	5,69	22,19	0,82	0,565	27,5	12,619
70–0–30 (двухкомпонентный ВУТ)	28,77	5,29	31,29	0,56	0,56	37,5	7,047
70–5–25	33,07	5,285	26,885	0,66	0,575	32,5	9,27
70–10–20	37,37	5,28	22,48	0,76	0,59	27,5	11,661
70–15–15	41,67	5,275	18,075	0,86	0,605	22,5	14,262
75–0–25 (двухкомпонентный ВУТ)	30,825	4,875	27,175	0,6	0,6	32,5	8,33
75–5–20	35,125	4,87	22,77	0,7	0,615	27,5	10,704
75–10–15	39,425	4,865	18,365	0,8	0,63	22,5	13,239
75–15–10	43,725	4,86	13,96	0,9	0,645	17,5	15,984
100–0–0 (чистый уголь)	41,1	2,8	6,6	0,8	0,8	7	16,01

Рис. 1. График зависимости низшей теплоты сгорания $Q_{\text{н}}^{\text{ВУТ}}$ от качественного состава ВУТFig. 1. Graph of the dependence of the lower calorific value $Q_{\text{н}}^{\text{ВУТ}}$ on the qualitative composition of the high-temperature fuel

Результат проведенных расчетов по определению зависимости низшей теплоты сгорания $Q_H^{\text{ВУТ}}$ от качественного состава ВУТ дан на рис. 1. Данный график наглядно показывает преимущество применения в составе ВУТ мазута по сравнению с двухкомпонентным ВУТ. Некоторая часть составов ВУТ по низшей теплоте сгорания практически достигают чистый уголь. При дальнейшем выборе оптимального состава ВУТ, для использования в промышленных котельных, необходимо руководствоваться экологическими и экономическими показателями.

1.2. Количество воздуха, необходимое для горения, $\text{м}^3/\text{кг}$

$$\alpha V_0 = \alpha(0,089(C^p + 0,375 S^p) + 0,265H^p - 0,033 O^p). \quad (14)$$

По приближенной формуле С. Г. Тройба, $\text{м}^3/\text{кг}$:

$$\alpha V_0 = \alpha \left(\frac{Q_H^{\text{ВУТ}}}{1000} + 0,007W_H^p - 0,06 O^p \right). \quad (15)$$

2.3. Объем продуктов сгорания при заданном значении α , $\text{м}^3/\text{кг}$

$$V_r = 0,01[1,86(C^p + 0,375 S^p) + 1,24(9H^p + W_H^p) + 1,6\alpha V_0 + 79\alpha V_0 + 0,8N^p + 21(\alpha - 1)V_0]. \quad (16)$$

Объем неразбавленных продуктов сгорания (при $\alpha = 1$), $\text{м}^3/\text{кг}$:

$$V_r^0 = 0,01[1,86(C^p + 0,375 S^p) + 1,24(9H^p + W_H^p) + 1,6V_0 + 79V_0]. \quad (17)$$

По приближенной формуле С. Г. Тройба объем продуктов сгорания при заданном значении α :

$$V_r = \alpha V_0 + \Delta V = \alpha V_0 + 0,12 \frac{Q_H^{\text{ВУТ}}}{1000} + 0,012W_H^p - 0,505, \quad (18)$$

тогда объем неразбавленных продуктов сгорания

$$V_r^0 = V_0 + \Delta V = V_0 + 0,12 \frac{Q_H^{\text{ВУТ}}}{1000} + 0,012W_H^p - 0,505. \quad (19)$$

2.4. Определяем теоретическую температуру сгорания t_0

Предварительно задаем значение $t_0 = 2000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Значения средней объемной теплоемкости продуктов сгорания и воздуха при постоянном давлении находим по табл. 2:

$$c'_r = 1,67 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \text{ }^\circ\text{C});$$

$$c'_b = 1,5 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \text{ }^\circ\text{C}).$$

Задаем температуру воздуха, подаваемого в топку: $t_b = 200 \text{ }^\circ\text{C}$, и по табл. 2 находим теплоемкость воздуха:

$$c'_{b,T} = 1,3 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \text{ }^\circ\text{C}).$$

Уточняем значение теоретической температуры сгорания по формуле, $^\circ\text{C}$:

$$t_0 = \frac{Q_H^{\text{ВУТ}} + \alpha c'_{b,T} t_b}{V_r^0 c'_r + (\alpha - 1)V_0 c'_b}. \quad (20)$$

Если полученное значение t_0 отличается от предыдущего более чем на $100 \text{ }^\circ\text{C}$, то расчет повторяем, выбирая из табл. 1 значения соответствующих теплоемкостей c'_r и c'_b , до выполнения принятого условия.

Задаваясь значением температуры газов на выходе из топки $t_{г.в.} = 1000$ °С, находим среднюю температуру факела топки, К:

$$T_{\phi} = \sqrt[4]{T_0^2 T_{г.в.}^2}, \quad (21)$$

где $T_0 = t_0 + 273$, К; $T_{г.в.} = t_{г.в.} + 273$, К; Тогда $t_{\phi} = T_{\phi} - 273$, К.

2.5. Определяем жаропроизводительность топлива заданного состава, °С

$$t_{max} = \frac{Q_n^{вут}}{V_r^0 c_r'}. \quad (22)$$

Результат проведенных расчетов по определению жаропроизводительности трехкомпонентного водоугольного топлива t_{max} представлен в табл. 5.

Таблица 5. Жаропроизводительность ВУТ заданного состава

Table 5. Heat output of VUT of a given composition

Топливо (уголь-мазут-вода), %	$Q_n^{вут}$, (МДж/кг)	Жаропроизводительность t_{max} , °С
ВУТ (75–0–25) (двухкомпонентный ВУТ)	8,33	1754
ВУТ (70–15–15)	14,262	1873
ВУТ (75–10–15)	13,239	1865
ВУТ (75–15–10)	15,984	1907

2.6. Определяем тепловую мощность подачи топлива на горелку

Если расход ВУТ на горелку $G_r^{вут} = 1$ т/ч (1000 кг/ч), то тепловая мощность определяется как (табл. 6)

$$N^{вут} = Q_n^{вут} \cdot G_r^{вут}. \quad (23)$$

Таблица 6. Сравнительная оценка жаропроизводительности топлив

Table 6. Comparative assessment of the heating efficiency of fuels

Топливо	Q_n (МДж/кг)	Жаропроизводительность при 1 т/ч, МВт
ВУТ (75–0–25 %) (двухкомпонентный ВУТ)	11,762	3,27
ВУТ (70–15–15 %)	17,12	4,75
ВУТ (75–10–15 %)	15,889	4,41
ВУТ (75–15–10 %)	17,968	4,99
Каменный уголь	12–25	3,3–6,94
Мазут	40	11,11

Таким образом, жаропроизводительность трехкомпонентного топлива даёт результат порядка 4–5 МВт полезной мощности для приведённого состава, что сопоставимо с практически-ми задачами котельной средней мощности.

Представленная модель наглядно показывает, как состав смеси (доли угля, воды, мазута) влияет на удельную теплоту. Жаропроизводительность топлива прямо пропорциональна качеству тепловой энергии, выделяющейся при его сжигании и отражает степень эффективности работы паровых и водогрейных котлов.

Включение воды неизбежно снижает тепловую отдачу из-за затрат на испарение, поэтому доля воды должна быть ограничена. Добавка мазута повышает теплоту сгорания, но требует оптимального баланса, чтобы не ухудшить стабильность горения и экологические показатели.

Для конкретных котельных агрегатов полезно к этой модели добавить расчёт движения потока, теплопереноса, влияния размеров частиц и скорости распыла.

Все вычисления по приближенному расчету горения ВУТ выполнены с применением программного пакета MathCAD.

Выводы

1. Жаропроизводительность трёхкомпонентного водоугольного топлива зависит от состава, особенно от содержания воды и добавок. При правильно подобранной рецептуре и технологии сжигания ВУТ может эффективно применяться в котельных агрегатах малой и средней мощности, снижая затраты и вредные выбросы.

2. ВУТ уступает однокомпонентным видам топлива по теплосодержанию, но выигрывает в экологии, утилизации отходов и может быть экономически выгоднее при использовании местного (не энергетического) топлива.

3. Присутствие воды в топливе снижает удельную теплоту сгорания, однако может оказывать положительное влияние на процесс горения. Так, за счет снижения температуры в зоне горения уменьшается образование NO_x , присутствие воды улучшает распыление топлива при подаче в топку и способствует микровзрывному дроблению капель и ускоряет выгорание угля. Однако избыток воды (>30–35 %) может привести к снижению температуры факела ниже порога устойчивого горения, увеличению тепловых потерь с уходящими газами и необходимости подогрева топлива перед подачей.

4. В основу сравнительного анализа разнокомпонентных видов топлива положены методы, принятые в Нормативном методе теплового расчета котлов. Он может быть рекомендован как дополнение к Нормативному методу.

5. В настоящее время в промышленности разработаны и внедряются типовые котлы, предназначенные для сжигания трехкомпонентного топлива. При сжигании ВУТ на существующих котельных требуется модернизация горелочных устройств, так как необходимы специальные форсунки для распыления вязкой суспензии. Также при переходе на ВУТ необходимо пересчитать КПД котла с учётом снижения Q_n и возможного увеличения потерь с уходящими газами.

Список литературы / References

- [1] Кнорре Г. Ф. *Теория топочных процессов*. М-Л.: Энергия, 1966. 491 с. [Knorre G. F. *Theory of combustion processes*. M–L.: Energy, 1966. 491 p. (in Russian)]
- [2] Иванов В. М. *Топливные эмульсии. АН СССР*. М., 1962. 216 с. [Ivanov V. M. *Fuel emulsions*. USSR Academy of Sciences. M., 1962. 216 p. (in Russian)]
- [3] Карабин А. И. *Сжигание жидкого топлива в промышленных установках*. М.: *Металлургия*, 1966. 371 с. [Karabin A. I. *Combustion of liquid fuel in industrial installations*. Moscow: Metallurgy, 1966. 371 p. (in Russian)]
- [4] Иванов В. М. О механике горения дисперсных топливных систем, *Химия и технология топлив и масел*. 1985. № 6. 18–20. [Ivanov V. M. On the mechanics of combustion of dispersed fuel systems, *Chemistry and technology of fuels and oils*. 1985. No. 6. 18–20 (in Russian)]
- [5] Винтовкин А. А., Ладыгичев М. Г. *Технологическое сжигание и использование топлива*. М.: *Металлургия*, 1988. 286 с. [A. A. Vintovkin, M. G. Ladygichev *Technological combustion and use of fuel*. M.: Metallurgy, 1988. 286 p. (in Russian)]
- [6] Верховский Н. И., Красноселов Г. К. *Сжигание высокосернистого мазута на электростанциях*. М.: Энергия, 1970. 447 с. [N. I. Verkhovsky, G. K. Krasnoselov *Combustion of high-sulfur fuel oil at power plants*. M.: Energy, 1970. 447 p. (in Russian)]
- [7] Ведрученко В. Р. Физико-химический анализ термохимических характеристик продуктов сгорания жидких углеводородных топлив, *Вестник СибАДИ. Сибирская гос. Автомобильно-дорожная акад. Омск*, 2004. Вып. 1. 93–98. [Vedruchenko V. R. Physicochemical analysis of thermochemical characteristics of combustion products of liquid hydrocarbon fuels, *Bulletin of SibADI / Siberian State Automobile and Road Academy. Omsk*, 2004. Issue 1. 93–98 (in Russian)]
- [8] Ведрученко В. Р. Повышение Эффективности сжигания обводненного жидкого топлива в топках котельных установок, *Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: Сб. трудов третьей всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Амурский гос. ун-т. Благовещенск*, 2003, Т. II, 291–297. [Vedruchenko V. R. Increasing the Efficiency of Combustion of Watered Liquid Fuel in Furnaces of Boiler Plants, *Power Engineering: Management, Quality and Efficiency of Energy Resources Use: Collection of Proceedings of the Third All-Russian Scientific and Technical Conf. with International Participation / Amur State University. Blagoveshchensk*, 2003, Vol. II, 291–297 (in Russian)]
- [9] Ведрученко В. Р. Каталитическое воздействие водной фазы водотопливных эмульсий и мобильные схемы их приготовления, *Промышленная теплоэнергетика*, 1998, 6, 21–24. [Vedruchenko V. R. Catalytic action of the aqueous phase of water-fuel emulsions and mobile schemes for their preparation, *Industrial thermal power engineering*, 1998, 6, 21–24 (in Russian)]
- [10] Ведрученко В. Р. Влияние химико-кинетических факторов на экологические показатели котельной установки при сжигании мазута и водомазутной эмульсии, *Омский научный вестник. Омский гос. техн. ун-т, Омск*, 2003, Вып. 1, 27–30. [Vedruchenko V. R. Influence of chemical-kinetic factors on the environmental performance of a boiler plant when burning fuel oil and water-fuel oil emulsion, *Omsk Scientific Bulletin / Omsk State Technical University. Omsk*, 2003, Issue 1, 27–30 (in Russian)]

Theoretical and Applied Heat Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: KBCPJQ

УДК 678.046

**The Surface Treatment Effect of High-Modulus Fabrics
on the Physical and Mechanical Properties
of Reinforced Elastomers in Various Environments**

Aital E. Markov^{a*},
Afanasii A. Dyakonov^{a,b}, Aleksei G. Tuisov^a,
Aitalina A. Okhlopkova^b, Aleksandr M. Spiridonov^b,
Anatoliy K. Kychkin^c and Aisen A. Kychkin^a

^a*The Yakut Scientific Centre of the SB RAS
Yakutsk, Russian Federation*

^b*M.K. Ammosov North- Eastern Federal University
Yakutsk, Russian Federation*

^c*Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS
Yakutsk, Russian Federation*

Received 15.10.2025, received in revised form 08.11.2025, accepted 13.01.2026

Abstract. The paper presents an investigation of the influence of hydrocarbon environment and high temperature on the properties of reinforced elastomers, depending on the surface treatment with modification of high-modulus fibers based on an elastomeric matrix (SKD). This material is modified by adding an extra layer of elastomer between basalt (BF) and carbon fabrics (CF) to improve surface contact between the fabrics. The introduction of high-modulus fabrics into the matrix leads to an increase in the tensile strength of reinforced samples up to 5 times and a significant reduction in deformation properties compared to the original elastomer. Exposure of samples to AMG-10 hydraulic oil led to swelling of the elastomer and its delamination from the reinforcing fabrics. When exposed to high temperatures, additional vulcanization of the elastomer occurs, which also leads to thermal shrinkage and a decrease in the mobility of rubber macromolecules, thereby increasing the tensile strength. Adhesion strength tests showed a decrease after exposure to hydraulic oil and high temperatures. They lead to the destruction of interphase connections on the surfaces of rubber and fabrics, with the negative effect affecting the elastomeric matrix in particular. The best adhesion strength result was shown by the SKD sample reinforced with BF and CF with Hemocil surface treatment.

Keywords: basalt fabric, carbon fabric, elastomer, adhesion, chemosil.

© 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: aital.markov@gmail.com

Acknowledgements. This study was conducted within the project of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. FWRS-2025–0027 (study of physical and mechanical characteristics) and No.FSRG-2023–0026 (microscopic examination).

Citation: Markov A. E., Dyakonov A. A., Tuisov A. G., Okhlopko A. A., Spiridonov A. M., Kychkin A. K., Kychkin A. A. The Surface Treatment Effect of High-Modulus Fabrics on the Physical and Mechanical Properties of Reinforced Elastomers in Various Environments. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(1), 16–24. EDN: KBCPJQ



Влияние поверхностной обработки высокомодульных тканей на физико-механические свойства армированных эластомеров в различных средах

**А. Е. Марков^а, А. А. Дьяконов^{а,б},
А. Г. Туйсов^а, А. А. Охлопкова^б,
А. М. Спиридонов^б, А. К. Кычкин^в, А. А. Кычкин^а**
*^аФИЦ «Якутский научный центр СО РАН»
Российская Федерация, Якутск
^бСеверо-Восточный федеральный университет
имени М. К. Аммосова
Российская Федерация, Якутск
^вИнститут физико-технических проблем Севера СО РАН
Российская Федерация, Якутск*

Аннотация. В статье приводится исследование влияния углеводородной среды и высокой температуры на свойства армированных эластомеров, в зависимости от поверхностной обработки модификацией высокомодульных волокон на основе эластомерной матрицы (СКД). Модификация данного материала заключается в добавлении дополнительного слоя эластомера между базальтовой (БТ) и углеродной тканью (УТ) для лучшего поверхностного контакта между тканями. Введение высокомодульных тканей в матрицу приводит к повышению предела прочности армированных образцов до 5 раз и существенному снижению деформационных свойств по сравнению с исходным эластомером. Выдержка образцов в гидравлическом масле АМГ-10 привела к набуханию эластомера и его отслоению от армирующих тканей. При воздействии высокой температуры происходит дополнительная вулканизация эластомера, что также ведет к термоусадке, снижению подвижности макромолекул каучука из-за чего повышается предел прочности на растяжение. Испытания на адгезионную прочность показали снижение после воздействия гидравлического масла и высокой температуры. Они приводят к разрушению межфазных соединений на поверхностях резины и тканей, отрицательное воздействие сказывается именно на эластомерную матрицу. Лучший результат адгезионной прочности показал образец СКД, армированный БТ и УТ, с поверхностной обработкой Хемосилом.

Ключевые слова: базальтовые волокна, углеродные волокна, эластомер, адгезия, Хемосил.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РФ, гранты FWRS-2025–0027 (исследование физико-механических характеристик) и FSRG-2023–0026 (микроскопические исследования).

Цитирование: Марков А. Е. Влияние поверхностной обработки высокомолекулярных тканей на физико-механические свойства армированных эластомеров в различных средах / А. Е. Марков, А. А. Дьяконов, А. Г. Туисов, А. А. Охлопкова, А. М. Спиридонов, А. К. Кычкин, А. А. Кычкин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(1). С. 16–24. EDN: KBCPJQ

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) являются отличной заменой основных конструкционных материалов, которые, в свою очередь, имеют множество положительных свойств [1]. Основные из них – коррозионная стойкость, меньшая масса, низкая теплопроводность и т.д. ПКМ состоят из двух или более компонентов, улучшая свойства конечного материала положительными характеристиками каждого из элементов. В качестве полимерной матрицы могут выступать эластомеры с различными химическими составами, такими как натуральные, бутадиеновые, нитрильные, стирольные каучуки [2, 3] и т.д. К одним из самых популярных наполнителей относят различного рода волокна (ткани), в основном стекло-, базальто- и углеволокна разных размеров: дисперсные, рубленые, однонаправленные. Для оптимального выбора армирующего материала смотрят на экономическую составляющую и физико-механические характеристики. Главной проблемой при создании ПКМ считается адгезионная прочность соединения между компонентами. Адгезия между эластомером и армирующими волокнами является важным функциональным свойством для надежности эксплуатации изделий. Поверхностная обработка высокомолекулярных волокон/тканей или добавление модификаторов, повышающих адгезионную прочность, стали решением данной проблемы [4–7].

Адгезивный состав Хемосила 411 в основном применяется для формирования прочного соединения в системе «резина–металл». Но многочисленные исследования показали, что ограничиваться одними металлами не стоит. Прочный адгезионный контакт после поверхностной обработки Хемосилом базальтовых и углеродных тканей обусловлен химической реакцией во время вулканизации. Изначально клей Хемосил предназначался для склеивания резины и металла. При соприкосновении с металлом органические смолы в составе Хемосила начинают взаимодействовать с оксидами металлов, образуя прочную ковалентную связь. Также возможно образование прочного соединения с базальтовой тканью, в составе которого присутствуют железо (Fe), медь (Cu) и другие металлы, углеродная ткань, имеющая в своем составе один лишь углерод (C), с легкостью образует химические связи с Хемосилом.

Образование прочного контакта Хемосила с резиновой матрицей происходит за счет того, что клей Хемосил диффундирует в резину во время вулканизации, образуя прочные химические связи. Кроме того, сера, находящаяся в составе эластомера, тоже образует поперечные мостики, из-за чего его связь становится прочнее, чем с тканью, вследствие чего разрушение после испытания на расслоение может носить когезионный характер [8, 9]. Высокая адгезионная прочность между двумя разными материалами важна для более длительной эксплуатации материала в той или иной отрасли. Хорошее адгезионное взаимодействие также может сыграть большую роль в экономическом плане, снизив расходы на изготовление и покупку материалов.

Целью данного исследования является изучение влияния клея Хемосил на физико-механические свойства между базальтовыми и углеродными волокнами в эластомерной матрице в системе “резина-ткань-резина-ткань-резина”, а также его влияния на свойства после воздействия углеводородной среды и высокой температуры.

Материалы и методы

Объектом исследования является морозостойкий эластомер [10] на основе бутадиенового каучука марки СКД-В (СИБУР, Россия), содержащий не менее 90 % 1,4 цис-звеньев, армированный базальтовой тканью (БТ) марки БТ-11 (Фабрика технических тканей, Россия), с поверхностной плотностью 351 г/м² и саржевым переплетением 5/3 и углеродной тканью (УТ) марки 2/2–1000–12К-400 (Препрег-СКМ, Россия), с плотностью 407 г/м² и саржевым переплетением 2/2. Рецепт резиновой смеси и процесс смешения: на нулевой минуте вводится 100 мас.ч. каучука СКД-В с 2 мас.ч. стеариновой кислоты; на 2-й минуте добавляется 50 мас.ч. технического углерода N 550; на 5-й минуте вводится 3 мас.ч. оксида цинка; на 10-й минуте добавляется 0,9 мас.ч. сульфенамида Ц; на 12-й минуте вводится 1,5 мас.ч. серы. Смешение ингредиентов производилось в лабораторном резиносмесителе закрытого типа PL-2200 (Brabender, Германия), общее время смешения 20 минут при начальной температуре валков 40 °С.

Увеличение прочности адгезионного соединения между связующим и армирующими тканями достигалась путем поверхностной обработки волокон адгезивом Хемосил 411 (Henkel, Германия). Адгезив Хемосил 411 наносили на БТ и УТ с сушкой в термошкафу при температуре 45 °С в течение 15 минут.

Для повышения адгезионной прочности базальто- и углеткани предварительно обрабатывались Хемосилом, а затем укладывались между слоями эластомера по схеме (рис. 1б) (БТ/СКД/УТ (Хем)). Также для сравнения исследовался образец без поверхностной обработки БТ и УТ (рис. 1а) (БТ/СКД/УТ).

Вулканизацию эластомеров (СКД) и эластомерных композитов проводили в термогидравлическом прессе ПКМВ-100 (Импульс, Россия) при 155 °С в течение 20 минут под давлением 10 МПа.

Упруго-прочностные и адгезионные свойства исходных образцов, образцов после выдержки выдержки в течение 72 часов в гидравлическом масле АМГ-10 при комнатной температуре и в термошкафу при температуре 100 °С определяли на универсальной испытательной машине Autograph (Shimadzu, Япония). Упруго-прочностные свойства исследовали в соответствии

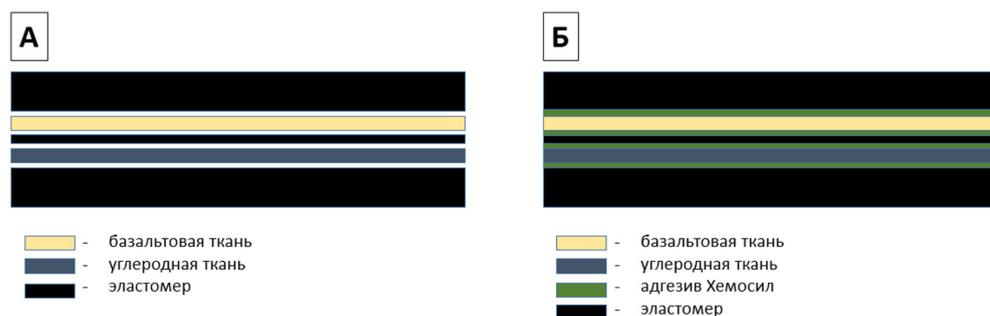


Рис. 1. Схематическая укладка армирующего наполнителя в эластомер: а) исходные БТ с УТ, уложенные между слоями эластомера; б) обработанные адгезивом Хемосил БТ с УТ, уложенные между слоями эластомера

Fig. 1. Schematic layout of reinforcing filler in elastomer: a) initial BF with UF laid between elastomer layers; b) BF with UF treated with adhesive Chemosil laid between elastomer layers

со стандартом ISO 37–2020 при комнатной температуре со скоростью растяжения 500 мм/мин. Прочность адгезионного соединения определяли по стандарту ISO 36–2017 при скорости передвижения захватов 50 мм/мин. Определение твердости Шор А эластомеров и композитов осуществляли по стандарту ISO 7619–1–2009. Исследование надмолекулярной структуры среза образцов проводили при помощи сканирующего электронного микроскопа JSM-7800F (JEOL, Япония) в режиме вторичных электронов.

Результаты и обсуждения

На рис. 2 показаны результаты испытания предела прочности исходных образцов, образцов после выдержки в гидравлическом масле АМГ-10 и при температуре 100 °С в течение 72 часов. На диаграмме приведены результаты предела прочности, введение высокомолекулярных тканей в эластомерную матрицу приводит к повышению прочности при растяжении по сравнению с исходным эластомером. Также прочность увеличилась и у образцов БТ/СКД/УТ после пропитки Хемосилом до 42,5 МПа. Выдержка образцов в гидравлическом масле АМГ-10 приводит к деструкции эластомерной матрицы и смягчению базальто- и углетканей. Поверхностная обработка БТ и УТ не только увеличивает прочность, но и выступает как защитный слой от воздействия масла. Результаты испытания после выдержки гидравлического масла образца БТ/СКД/УТ (Хем) составили 24,7 МПа, а у образца БТ/СКД/УТ – 8,1 МПа. Термическое воздействие приводит к усадке эластомерной матрицы, что приводит к образованию более плотного прилегания матрицы к армирующим тканям, за счет чего наблюдается повышение предела прочности. Хемосил же выступает как клеевой слой и имеет крепкий контакт с резиной за счет прочных химических связей с оксидами металлов. Твердый слой Хемосила на границе «резина-ткань» не позволяет проникнуть резине плотнее межволокон, повышая прочность до 49,8 МПа.

Также получены результаты относительного удлинения образцов СКД, БТ/СКД/УТ и БТ/СКД/УТ (Хем) после воздействия гидравлического масла АМГ-10 и термического старения, представленные на рис. 3. Армирование резины высокомолекулярными волокнами ведет за собой

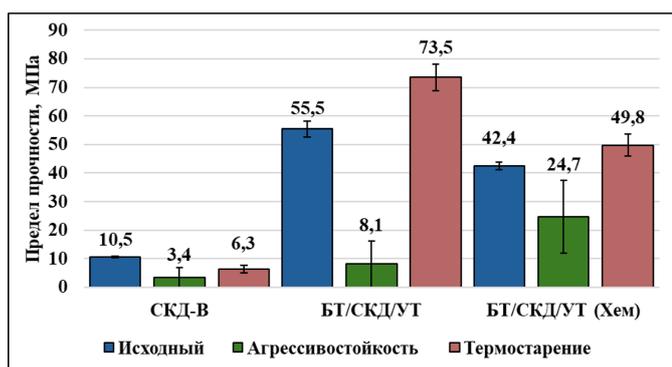


Рис. 2. Диаграмма предела прочности эластомера и композитов до, после выдержки в гидравлическом масле АМГ-10 и термического старения

Fig. 2. Diagram of the tensile strength of elastomers and composites before and after exposure to AMG-10 hydraulic oil and thermal aging

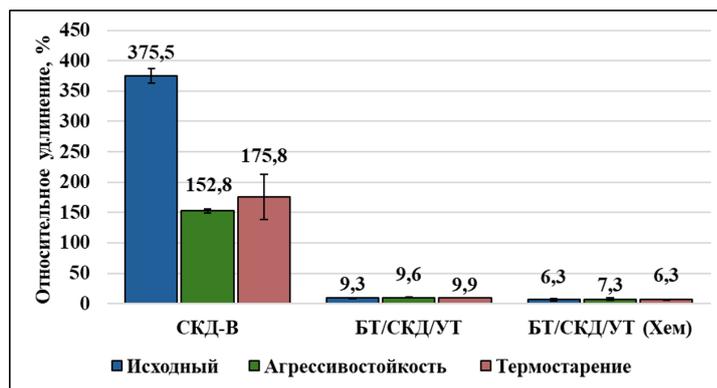


Рис. 3. Диаграмма относительного удлинения эластомера и эластомеров от высокомодульных волокон до, после выдержки в гидравлическом масле АМГ-10 и термического старения

Fig. 3. Diagram of relative elongation of elastomers and composites before and after exposure to AMG-10 hydraulic oil and thermal aging

повышение прочности на растяжение, но ухудшает упругие свойства эластомера. Воздействие гидравлического масла АМГ-10 и высокой температуры на армированные образцы не оказывает влияния на показатели относительного удлинения по сравнению с исходными образцами. Причиной этому являются высокомодульные ткани, которые имеют низкие растягивающиеся свойства. Введение армирующих тканей в эластомерную матрицу приводит к существенному снижению относительного удлинения.

Результаты испытания когезионной и адгезионной прочности исходного эластомера и эластомерных образцов армированных БТ с УТ после воздействия гидравлического масла АМГ-10 и термического старения представлены на рис. 4. Адгезионная прочность соединения эластомерной матрицы с базальто- и углетканью меньше, чем когезионная прочность эластомера. Это объясняется плохим поверхностным контактом между матрицей и армирующими тканями. Однако после поверхностной обработки тканей адгезионная прочность соединения увеличилась в 2,5 раза по сравнению с исходным эластомером. Хемосил проявил себя как клеящая основа между тканью и эластомером, в ходе чего образовался плотный контакт на межфазной границе и из-за чего разрушение носило когезионный характер. После выдержки в масле АМГ-10 происходит набухание эластомера и его отслоение от ткани, несмотря на поверхностную обработку. При термическом старении происходит усадка эластомера, вследствие чего ослабевает сцепление матрицы с БТ и УТ.

Добавление эластомерного слоя между базальтовой и углеродной тканью повысило адгезию только в образце с поверхностной обработкой Хемосилом. Причиной является химический состав клея Хемосил и его предназначение для склейки металлов с эластомерами.

На рис. 5 представлены микрофотографии срезов образцов для определения визуального влияния поверхностной обработки БТ и УТ на контакт с эластомером. Эластомерная матрица (рис. 5а) имеет однородную структуру, структурный однородный вид матрицы характерен для всех исследуемых образцов, что позволяет сосредоточиться на оценке межфазной границы раздела с волокном. У образца без поверхностной обработки (рис. 5б) наблюдается неплотное прилегание базальтовых волокон (БВ) к эластомерной матрице, также видна четкая

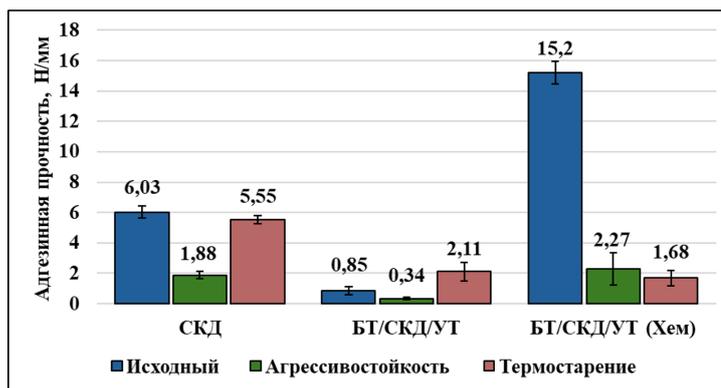


Рис. 4. Диаграмма показателей расслоения эластомера и эластомеров от высокомодульных волокон до, после выдержки в гидравлическом масле АМГ-10 и термического старения

Fig. 4. Diagram showing elastomer delamination indicators from high-modulus fibers before and after exposure to AMG-10 hydraulic oil and thermal aging

граница раздела между углеродными волокнами (УВ) и эластомером. Образование четких границ и зазоров между материалами указывает на слабое адгезионное взаимодействие, что подтверждается результатами испытания на расслоение. Образец композита с поверхностно обработанными волокнами клеем Хемосил имеет на поверхности обломки БВ (рис. 5в), что свидетельствует о более сильном взаимодействии между волокнами и резиной. Увеличение прочности также подтверждается испытанием на расслоение и наличием плотного контакта

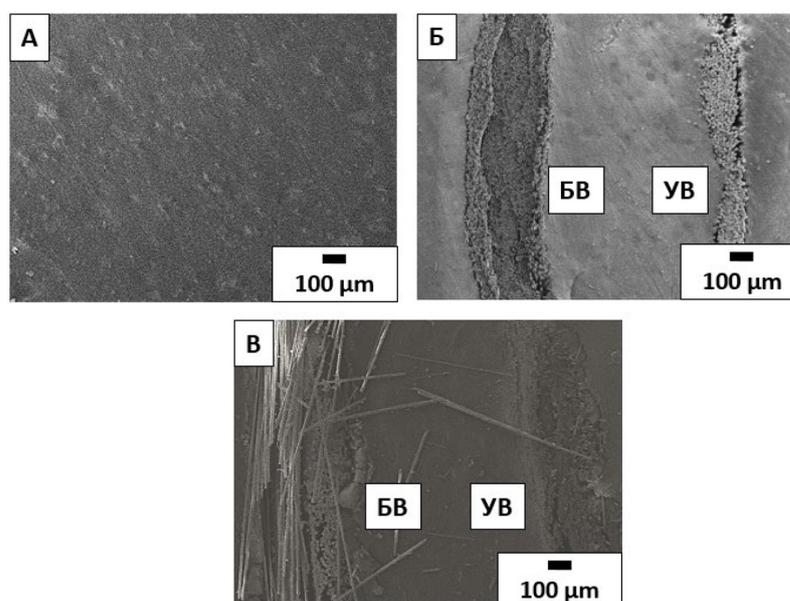


Рис. 5. Микрофотографии структуры срезов эластомера и межфазных границ: а) исходного эластомера; б) БТ/СКД/УТ; в) БТ/СКД/УТ (Хем)

Fig. 5. Micrographs of the structure of elastomer sections and interphase boundaries: a) original elastomer; b) BF/SKD/UF; c) BF/SKD/UF (Chem)

между волокнами тканей с эластомерной матрицей, где Хемосил выступил прочным связующим между материалами.

Заключение

В ходе исследования было установлено, что армирование эластомерной матрицы базальто- и углетканью увеличивает прочность до 5,5 раза по сравнению с исходной резиной, но существенно снижает удлинение при растяжении. После выдержки армированных образцов в гидравлическом масле АМГ-10 происходит набухание эластомера, что приводит к уменьшению прочностных показателей. Образец с поверхностной обработкой волокон сохранил наибольшие прочностные свойства за счет “экранирующего” действия клея Хемосил, что снизило деструктивные действия гидравлического масла на армирующие ткани. Под воздействием высокой температуры происходит термоусадка эластомерной матрицы и её более плотное прилегание к армирующим материалам, что приводит к повышению прочности. Анализ результатов испытания на расслоение показал, что образец БТ/СКД/УТ (Хем) обладает высокой адгезионной прочностью, превышающей когезионную прочность эластомера. Таким образом, можно сделать вывод о том, что поверхностная обработка УТ и БТ Хемосилом играет важную роль для повышения эксплуатационных свойств эластомеров, в особенности адгезионной прочности соединения с матрицей.

Список литературы / References

- [1] Oladele I. O., Omotosho T. F., Adediran A. A. Polymer-Based Composites: An Indispensable Material for Present and Future Applications, *International Journal of Polymer Science*, 2020, 2020, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2020/8834518>
- [2] Bakošová A., Bakošová D., Dubcová P., Klimek L., Dedinský M., Lokšíková S. Effect of Thermal Aging on the Mechanical Properties of Rubber Composites Reinforced with Carbon Nanotubes, *Polymers*, 2025, 17, 896. <https://doi.org/10.3390/polym17070896>
- [3] Kruželák J., Džuganová M., Kvasničáková A., Hronkovič J., Pret’o J., Chodák I., Hudec I. Sulfur and Peroxide Cross-Linking of Lignosulfonate-Filled Compounds Based on Acrylonitrile–Butadiene Rubber and Styrene–Butadiene Rubber, *Polymers*, 2025, 17, 950. <https://doi.org/10.3390/polym17070950>
- [4] Meng L., He J., Pan C. Research Progress on Hydrogel–Elastomer Adhesion, *Materials*, 2022, 15, 2548. <https://doi.org/10.3390/ma15072548>
- [5] Slobodkina K. N., Vernigorov K. B., Abzal’dinov K. S., Kazakov Yu. M., Stoyanov O. V. Effect of Modifying Additives on Adhesive Characteristics of Composites Based on Nitrile–Butadiene Rubber–Tiokol Mixtures, *Polym. Sci. Ser. D*, 2025, 18, 535–539. <https://doi.org/10.1134/S1995421225700492>
- [6] Копырин М. М., Марков А. Е., Дьяконов А. А., Туйсов А. Г., Лебедев М. П., Кычкин А. А., Охлопкова А. А., Лазарева Н. Н., Данилова С. Н. Обработка поверхности армирующего наполнителя из углеволокна для повышения адгезии с бутадиеновым эластомером, *Журнал СВУ. Техника и технологии*, 2023, 16(4), 450–460. [Kopyrin M. M., Markov A. E., Dyakonov A. A., Tuisov A. G., Lebedev M. P., Kychkin A. A., Okhlopko A. A., Lazareva N. N., Danilova S. N. Surface Treatment of Carbon Fiber Reinforcement to Increase Adhesion with Butadiene Elastomer, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2023, 16(4), 450–460 (in Russian)]

[7] Lobov E., Vindokurov I., Tashkinov M. Mechanical Properties and Performance of 3D-Printed Acrylonitrile Butadiene Styrene Reinforced with Carbon, Glass and Basalt Short Fibers, *Polymers*, 2024, 16, 1106. <https://doi.org/10.3390/polym16081106>

[8] Crowther B. *Handbook of Rubber Bonding* (Revised Edition) – Shawbury, Shrewsbury, Shropshire: Rapra Technology Limited, 2003. 373 p.

[9] Puchkov A.F., Spiridonova M.P., Kosobokova S.D. Use of Lactam-Containing Plastics from Halogenated Polymers for Improving the Strength of Adhesion between an Ethylene–Propylene Elastomer Composite and a Metal, *Polym. Sci. Ser. D*, 2023, 16, 793–797. <https://doi.org/10.1134/S1995421223030267>

[10] Timofeeva E.N., Petrova N.N., Nikolaeva K.N., Kuzmina E.S. The Research of the Effect of Single-Walled Carbon Nanotubes on the Properties of Epichlorohydrin Rubber, *Materials Science Forum*, 2019, 945, 428–432. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.945.428>

Theoretical and Applied Heat Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: HQSOOQ

УДК 621.45

**Intensification of Heat Transfer by Optimizing
the Geometric Parameters of the Fins
in the Cooling Channels of the Turbine Blades**

**Chzhen Guankhua^a,
Dmitriy A. Uglanov^{b*}, Lyu Tszyuntsze^b,
Ilya F. Leykovskiy^b, Artem A. Shimanov^b,
Viktor V. Uralapkin^b and Natalya V. Galkina^b**

*^aNorthwestern Polytechnical University
Xi'an, People's Republic of China*

*^bSamara National Research University
Samara, Russian Federation*

Received 30.06.2025, received in revised form 25.10.2025, accepted 06.11.2025

Abstract. The use of turbulizer fins in the internal cooling space of the turbine blade makes it possible to significantly intensify the heat transfer characteristics in the channel. The V-shaped fins have a high degree of heat exchange intensification, and also provide the minimum possible loss of air flow pressure in the channel of the outlet edge of the cooled turbine blade with blowing into the trailing edge and lower part. In this article, various computational models have been created using numerical modeling, one of which includes V-shaped edges with different heights and the distance between them (pitch). The influence of the geometric parameters of the V-shaped fins on the heat exchange process in the channels of the turbine blade is estimated, and the best combination of the geometric characteristics of the fins is obtained using numerical modeling. The results of the study show that increasing the height of the fins and decreasing the distance between them intensifies the heat exchange process, but at the same time it leads to an increase in hydraulic resistance. Using the Nusselt number as an optimization parameter for various geometric parameters of the V-shaped rib allows us to determine that the heat transfer coefficients of the optimized model have increased significantly, and the average Nusselt number in the channel has increased by 29.54 % compared to the original model.

Keywords: turbine blade, V-shaped fin, heat transfer coefficient, Nusselt number, turbulator, hydraulic resistance.

Acknowledgements. The results of the work were obtained with the financial support of the Ministry of Education and Science of Russia (project No. FSSS-2024–0017).

© 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: uglanov.da@ssau.ru

Citation: Chzhen Guankhua, Uglanov D. A., Lyu Tszuuntsze, Leykovskiy I. F., Shimanov A. A., Uralapkin V. V., Galkina N. V. Intensification of Heat Transfer by Optimizing the Geometric Parameters of the Fins in the Cooling Channels of the Turbine Blades. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(1), 25–41. EDN: HQSOOQ



Интенсификация теплообмена за счет оптимизации геометрических параметров ребер в каналах охлаждения лопаток турбин

**Чжэн Гуанхуа^а, Д. А. Угланов^б,
Лю Цзюньцзе^б, И. Ф. Лейковский^б,
А. А. Шиманов^б, В. В. Урлапкин^б, Н. В. Галкина^б**

*^аСеверо-западный политехнический университет
Китайская Народная Республика, Сиань*

*^бСамарский национальный исследовательский университет
Российская Федерация, Самара*

Аннотация. Использование ребер-турбулизаторов во внутреннем охлаждающем пространстве лопатки турбины позволяет существенно интенсифицировать характеристики теплоотдачи в канале. V-образные ребра обладают высокой степенью интенсификации теплообмена, а также обеспечивают минимально возможные потери давления воздушного потока в канале выходной кромки охлаждаемой лопатки турбины с выдувом в заднюю кромку и нижнюю часть. В данной статье с помощью численного моделирования созданы различные расчетные модели, одна из которых включает V-образные ребра с различной высотой и расстоянием между ними (шагом). Оценено влияние геометрических параметров V-образных ребер на процесс теплообмена в каналах лопатки турбины, а также с помощью численного моделирования получено наилучшее сочетание геометрических характеристик ребер. Результаты исследования показывают, что увеличение высоты ребер и уменьшение расстояния между ними интенсифицирует процесс теплообмена, но в то же время это приводит к увеличению гидравлического сопротивления. Использование числа Нуссельта в качестве параметра оптимизации при различных геометрических параметрах V-образного ребра позволяет определить, что коэффициенты теплоотдачи оптимизированной модели значительно повысились, а среднее число Нуссельта в канале увеличилось на 29,54 % по сравнению с исходной моделью.

Ключевые слова: лопатка турбины, V-образное ребро, коэффициент теплоотдачи, число Нуссельта, турбулизатор, гидравлическое сопротивление.

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

Цитирование: Чжэн Гуанхуа. Интенсификация теплообмена за счет оптимизации геометрических параметров ребер в каналах охлаждения лопаток турбин / Чжэн Гуанхуа, Д. А. Угланов, Лю Цзюньцзе, И. Ф. Лейковский, А. А. Шиманов, В. В. Урлапкин, Н. В. Галкина. // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(1). С. 25–41. EDN: HQSOOQ

Введение

В настоящее время лопатки современных газотурбинных двигателей (ГТД) охлаждаются потоком воздуха, отбираемым из компрессора. Для снижения температуры высоконагруженных

элементов турбины реализуются две схемы охлаждения: внутренняя и внешняя [1]. Внутреннее охлаждение осуществляется через каналы во внутренней полости лопаток турбины. Охлаждающий воздух, отбираемый из компрессора, поступает в каналы, сформированные во внутренней полости лопатки, и, проходя через них, снижает её температуру. Распространённым методом интенсификации внутреннего охлаждения является применение турбулизаторов в каналах. Использование турбулизаторов усиливает возмущение потока газа, тем самым усиливая эффект конвективного теплообмена. Турбулизаторы бывают разных видов и форм: рёбра, ряды завихрителей и штырьков, лунки и т.д. После того как охлаждающий воздух проходит через рёбра, происходит отрыв пограничного слоя и последующая турбулизация потока, увеличивая интенсификацию теплообмена вблизи стенки внутреннего канала охлаждения лопатки [2].

На эффективность охлаждения влияют геометрические параметры ребер и их форма. В работах [3–5] изучаются влияния различных форм рёбер на характеристики процесса теплообмена в канале, а в работах [6–13] проведен всесторонний анализ эффективности теплоотдачи различных типов рёбер, таких как горизонтальные, наклонные и V-образные. С помощью численного моделирования в сочетании с экспериментальными данными детально исследован механизм интенсификации теплоотдачи на ребрах стенок внутренних каналов лопаток. На рис. 1 показан отрыв ламинарного пограничного слоя и последующее соединение турбулизированного потока после его прохождения в канале с оребренной поверхностью. Явление отрыва и последующего соединения потока воздуха может быть вызвано оребренной стенкой канала, обеспечивающей интенсификацию теплообмена.

В работе [14] проведено исследование влияния V-образных рёбер на интенсификацию теплообмена в канале при различных углах их расположения в диапазоне чисел Рейнольдса от 15 000 до 30 000. Результаты показывают, что V-образные рёбра, направленные против потока, обладают более высокой эффективностью теплоотдачи в канале, чем прямые горизонтальные рёбра, а V-образные рёбра с углом наклона в 45° являются наиболее эффективными с точки зрения охлаждения стенок канала (рис. 2).

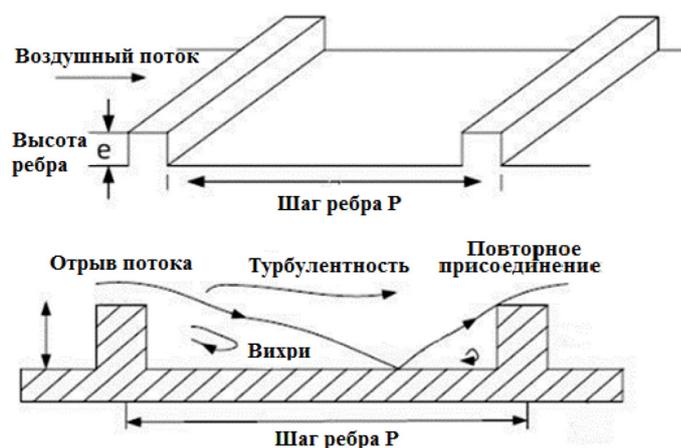


Рис. 1. Принципиальная схема отрыва и последующего соединения потока воздуха при проходе через ребра

Fig. 1. Schematic diagram of the separation and subsequent connection of the air flow as it passes through the fins

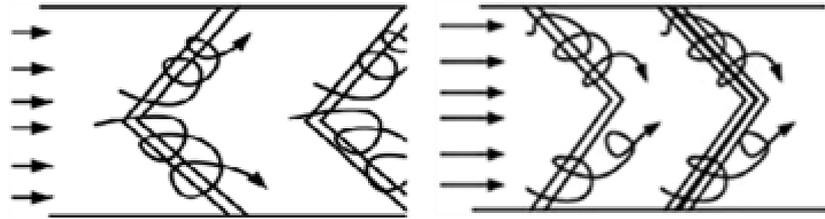


Рис. 2. Вторичные потоки, создаваемые V-образными рёбрами, направленными против и навстречу потоку
 Fig. 2. Secondary flows created by V-shaped edges directed against and towards the flow

В работе [15] исследуются процессы теплообмена потока с параллельными V-образными рёбрами, ребрами, расположенными в шахматном порядке, прерывистыми параллельными V-образными рёбрами, с параллельными наклонёнными рёбрами, наклонными ребрами, расположенными в шахматном порядке и с наклонными прерывистыми ребрами (рис. 3).

Исследование показало, что независимо от расположения рёбер в канале наиболее эффективный теплообмен наблюдается с V-образными рёбрами. Процесс теплообмена в канале с наклонными ребрами менее эффективный, а теплообмен в канале с параллельными V-образными рёбрами и в каналах с поперечным расположением V-образных рёбер имеет примерно одинаковую эффективность. В работе [16] представлены результаты исследования характеристик потока и механизм тепломассообмена оребрённого канала внутри лопатки турбины, и обнаружено, что наклонная структура рёбер позволяет увеличить число Рейнольдса потока охлаждающего воздуха, тем самым увеличить интенсивность турбулентных возмущений и интенсифицировать охлаждение стенок канала. Для изучения влияния высоты V-образного ребра, а также расстояния между ними и угла их наклона на эффективность

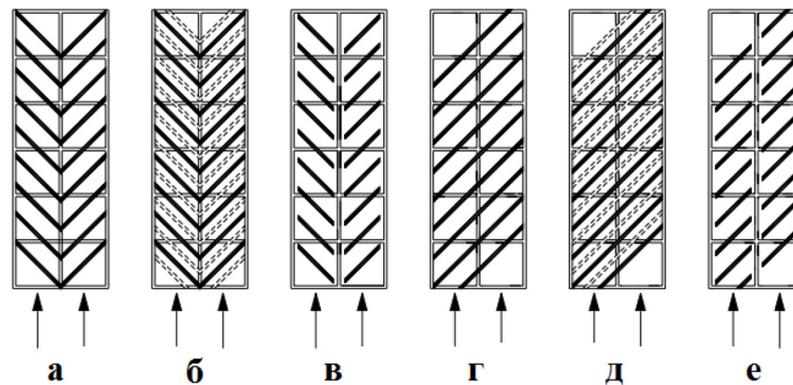


Рис. 3. Различные формы ребер: а – непрерывные параллельные V-образные ребра; б – шахматное расположение непрерывных ребер; в – прерывистые параллельные V-образные ребра; г – непрерывные ребра, расположенные под углом; д – шахматное расположение прерывистых ребер под углом; е – параллельные ребра, расположенные под углом

Fig. 3. Different shapes of edges: a – continuous parallel V-shaped edges; b – staggered continuous edges; c – discontinuous parallel V-shaped edges; d – continuous edges at an angle; e – staggered edges at an angle; f – parallel edges at an angle

теплопередачи на задней кромке канала, в лопатке турбины на стороне её корытца проведены расчётные исследования процессов теплопередачи с изменением расстояния между ребрами, углом их наклона и высотой.

1. Численное моделирование процессов теплообмена

1.1. Основные уравнения

Основные законы механики жидкости и газа, которым подчиняется течение жидкости, являются теоретической основой для установления базовой системы уравнений её движения. Основные уравнения включают: уравнение неразрывности потока, уравнение сохранения импульса и уравнение сохранения энергии. В декартовой системе координат эти три уравнения сохранения выражаются следующим образом.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

где ρ – плотность текущей среды; u – скорость воздуха в направлении x ; v – скорость воздуха в направлении y ; w – скорость воздуха в направлении z .

Уравнение сохранения импульса:

$$\rho F - \text{grad} p + \frac{\mu}{3} \text{grad}(\text{div} \cdot v) + \mu \nabla^2 v - \rho \frac{\partial v}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

где F – сила; p – давление текущей среды; μ – вязкость текущей среды.

Закон сохранения энергии:

$$u \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y} + w \frac{\partial t}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

a – коэффициент теплопроводности.

1.2. Определение параметров

Определяемыми в данном расчетном исследовании параметрами, характеризующими интенсивность процесса теплообмена между охлаждающим воздухом и поверхностью лопатки, являются число Рейнольдса, число Нуссельта, коэффициент теплоотдачи и т.д. Некоторые параметры определяются в процессе численного моделирования, а часть параметров определяются через дополнительные вычисления. Все эти параметры определяются следующим образом:

а) число Рейнольдса на входе в заднюю кромку канала.

Число Рейнольдса – это безразмерное число, используемое для определения режима течения жидкостей и газов. Режим течения потока в канале может быть ламинарным или турбулентным, и оно зависит от внешних возмущений [5–7].

Число Рейнольдса определяется по следующим соотношениям:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}, \quad (4)$$

где ρ – плотность охлаждающего воздуха (кг/м^3); V – скорость потока охлаждающего воздуха (м/с); D – эквивалентный диаметр канала на задней кромке лопатки (м); μ – динамическая вязкость воздуха ($\text{Н} \cdot \text{с/м}^2$).

б) число Нуссельта на стенке задней кромки лопатки в канале.

Число Нуссельта – это один из основных критериев подобия тепловых процессов, характеризующий соотношение между интенсивностью теплообмена за счёт конвекции и интенсивностью теплообмена за счёт теплопроводности. Для интенсификации теплообмена необходимо обеспечить как можно более высокое значение данного критерия.

Данный критерий определяется следующим образом:

$$Nu = \frac{qD_{\text{экв}}}{\lambda(T_w - T_f)}. \quad (5)$$

Величина q – плотность теплового потока в канале на хвостовой кромке лопатки, (Вт/м^2); λ – теплопроводность потока охлаждающего воздуха в канале; T_w – температура стенки канала

задней кромки (K); T_f – температура потока воздуха (K); $D_{\text{экв}} = \frac{4F}{\pi}$ – эквивалентный диаметр.

в) для данной задачи критериальное уравнение для определения числа Нуссельта (коэффициента теплоотдачи) при вынужденном турбулентном течении в канале охлаждения Nu_f имеет вид:

$$Nu_f = 0,23Re^{0,8}Pr^{0,4}. \quad (6)$$

Это выражение используется для определения коэффициента теплоотдачи с турбулентного потока в канале, Pr – число Прандтля потока воздуха.

г) коэффициент лобового сопротивления канала задней кромки R .

Безразмерный коэффициент сопротивления R вводится для измерения сопротивления потока охлаждаемого воздуха стенкам канала. Чем выше это значение, тем больше сопротивление движению потока воздуха со стороны стенки канала. Данный коэффициент сопротивления определяется следующим образом:

$$R = \frac{2D(p_{in} - p_{out})}{L\rho V^2}, \quad (7)$$

где L – длина канала (м); p_{in} и p_{out} соответственно давление на входе и выходе в канале задней кромки лопатки.

д) эмпирическая формула для определения коэффициента лобового сопротивления гладкой круглой трубы R_f .

Для данного случая эмпирическая формула для коэффициента лобового сопротивления в канале может быть описана следующим соотношением:

$$R_f = 0.3164Re^{-0.25}. \quad (8)$$

Данное соотношение может быть использовано для потока с числом Рейнольдса, $Re \leq 100000$.

е) комплексный безразмерный коэффициент теплоотдачи ИНТФ (Интегрированный безразмерный коэффициент теплоотдачи).

Поскольку как число Нуссельта, так и коэффициент лобового сопротивления могут влиять по отдельности только на процесс теплообмена или гидрогазодинамические параметры, поэтому невозможно провести комплексную оценку эффективности процесса охлаждения в канале. Исходя из этого предлагается использовать комплексный коэффициент теплоотдачи в качестве параметра для решения этой задачи. Формула определения этого параметра выглядит следующим образом:

$$INTF = \frac{Nu / Nu_f}{(R / R_f)^{1/3}}. \quad (9)$$

1.3. Расчетная модель объекта исследования

Расчётная модель, используемая в данном исследовании, представлена на рис. 4. Трёхмерная модель лопатки имеет два выхода, отверстия в нижней кромке и множество отверстий на задней кромке. Длина хорды лопатки базовой модели составляет 154,5 мм, длина осевой хорды – 123 мм, её высота – 140 мм, а диаметр выходного отверстия на нижней кромке – 9 мм. Данная работа представляет собой численное моделирование процессов охлаждения в лопатке. Для обеспечения необходимого условия теплообмена в лопатке применяется охлаждающий канал с тремя проходами, в котором движется охлаждающий поток воздуха. Канал имеет оребрённую поверхность, позволяющую повысить эффективность теплообмена. Для этого используют V-образные ребра, турбулизаторы у задней кромки пера лопатки, а их кончики V-образных ребер ориентированы в направлении основного потока охлаждающего воздуха (рис. 4).



Рис. 4. Геометрическая модель лопатки турбины

Fig. 4. Geometric model of a turbine blade

В данной работе изучается влияние V-образных рёбер-турбулизаторов в канале задней кромки на процесс теплообмена в охлаждающем канале лопатки. На первом этапе моделирования для оптимизации оребрённый канал задней кромки лопатки был параметризован. На рис. 4 представлена схема основных геометрических параметров V-образных рёбер. В программе Solidworks задавались размеры V-образных рёбер, таких как расстояние между соседними рёбрами P (шаг), e – высота, α – угол наклона. Базовая модель включает следующие геометрические параметры: высота V-образных рёбер $e=0,75$ мм, расстояние между рёбрами $P=12$ мм и угол наклона ребер $\alpha=45^\circ$. Параметрическая модель позволяет изменить определённый параметр, что значительно сокращает затраты времени на процесс моделирования (рис. 5).

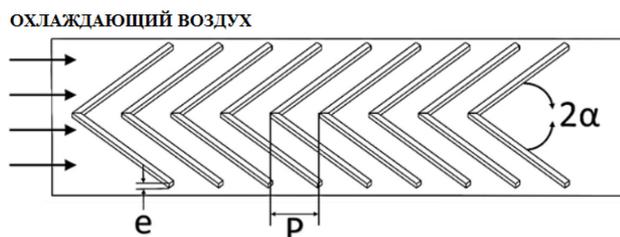


Рис. 5. Параметрическая модель геометрии V-образного ребра канала охлаждения

Fig. 5. Parametric model of the geometry of the V-shaped cooling channel fin

Для построения сеточной модели и численного моделирования использовался программный продукт ANSYS Workbench. Сложная геометрия расчетной модели с оребрённой поверхностью каналов охлаждения затрудняет построение структурированной сеточной модели, поэтому частично построена неструктурированная сеточная модель. Для создания в модели условий турбулентности потока у стенки внутреннего канала необходимо обеспечить, чтобы значение Y^+ конечно-элементной сетки расчётной модели было меньше 1, а пристеночный пограничный слой должен составлять не менее 10 ячеек по толщине. При разбивке сеточной модели устанавливается высота первого слоя – 0,02 мм и генерируется 10-слойная сетка пограничного слоя с коэффициентом сгущения 1,2. Конечно-элементная сетка представлена на рис. 6. Проверка конечно-элементной модели показала, что коэффициент скошенности элементов модели составляет менее 0,8, а ортогональность выше 0,3, что соответствует требованиям обеспечения точности расчётных исследований.

В процессе численного моделирования охлаждения канала лопатки большее влияние на точность расчётных исследований оказывает количество элементов. Оценка влияния количества элементов представлена на рис. 7 и 8. На этих рисунках представлены коэффициент расхода через нижнее выходное отверстие (отношение массового расхода через нижнее выходное отверстие лопатки к массовому расходу на входе) и среднее число Нуссельта в канале лопатки в зависимости от количества элементов сеточной модели. Из этого следует, что при количестве элементов более 7 миллионов эти два параметра практически остаются неизменными (отличие этих двух элементов составляет 1,5 %), таким образом, оптимальное количество элементов в расчетной модели будет составлять 9 миллионов.

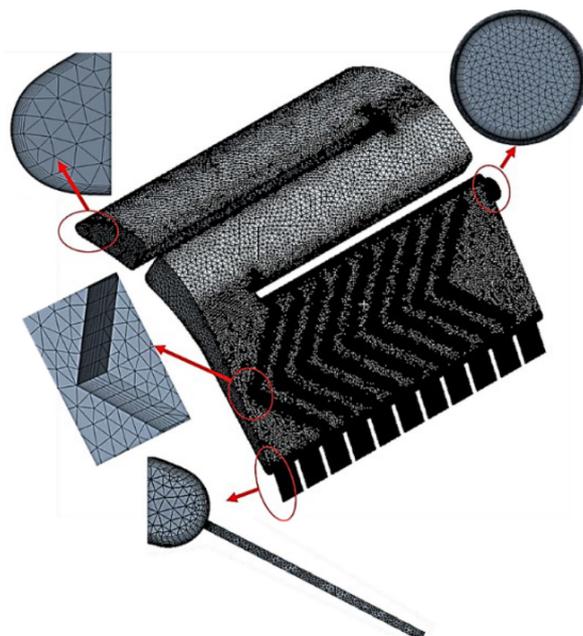


Рис. 6. Конечно-элементная модель проточного канала

Fig. 6. Finite element model of a flow channel

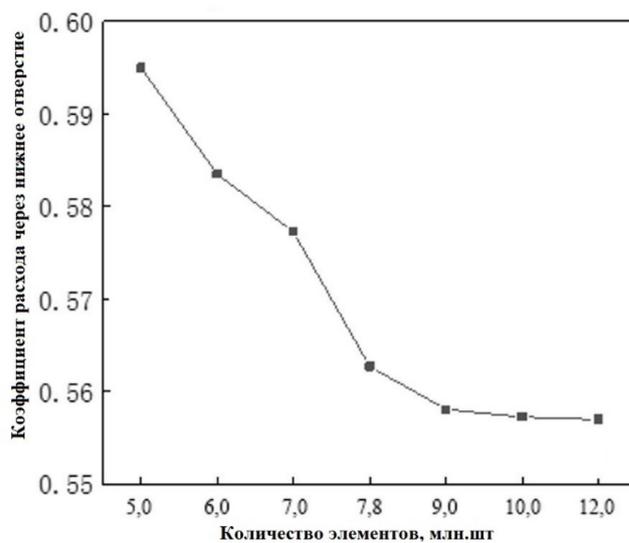


Рис. 7. Коэффициент расхода через нижнее отверстие в зависимости от количества элементов

Fig. 7. Flow rate coefficient through the lower opening, depending on the number of elements

1.4. Граничные условия

При использовании программы Ansys Fluent для вычислений необходимо задать соответствующие граничные условия. Расход газа в канале охлаждения лопатки турбины является постоянным и задается в качестве исходных данных. На входе задается температура газа, равная

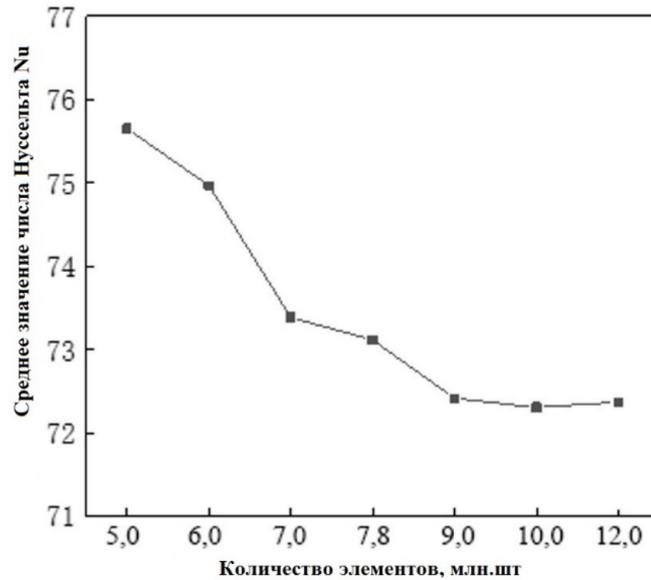


Рис. 8. Среднее значение Nu от количества элементов сеточной модели

Fig. 8. Average value of Nu versus the number of grid model elements

300 К, число Рейнольдса на входе в охлаждающий канал изменяется в зависимости от массового расхода газа на входе. В процессе исследования число Рейнольдса на входе в канал изменяется в диапазоне 5500–19000, а выходное давление на нижнем выходном отверстии и в выходных отверстиях задней кромки равны давлению окружающей среды.

1.5. Алгоритм настройки и оптимизации

В реальных задачах инженерной оптимизации проектные переменные и ограничения, как правило, линейны, непрерывны и монотонны. С другой стороны, переменные оптимизации имеют сложные характеристики, такие как нелинейность, прерывистость и мультимодальность. Поэтому для решения задач необходимо использовать алгоритмы общей оптимизации. Преимущество алгоритмов полной оптимизации заключается в том, что они позволяют полностью решить сложную комплексную задачу, но недостатком является большой объём вычислений и время, затрачиваемое на их вычисление. В этой статье используются три переменных оптимизации. Основными алгоритмами общей оптимизации, которые могут быть вызваны в платформе Isight optimization platform, являются: алгоритм (MIGA), алгоритм автоматической оптимизации (Pointer), эволюционный алгоритм (Evol), алгоритм (ASA) и алгоритм оптимизации (PSO). Алгоритм (MIGA), обладающий высокой надёжностью, используется для оптимизации параметров V-образных рёбер в канале охлаждения лопатки. При интеграции Solidworks и Ansys Workbench через модуль оптимизации в программном обеспечении Isight выбирается алгоритм MIGA в модуле оптимизации. Далее устанавливается диапазон значений переменных оптимизации. Затем выбирается параметр оптимизации, и автоматически реализуется процесс изменения расчётной модели, построения конечно-элементной сетки и запускается расчёт оптимизации параметров и процессов в лопатке.

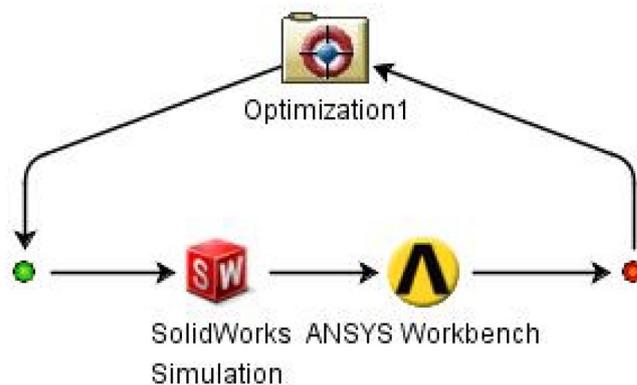


Рис. 9. Схема процесса оптимизации

Fig. 9. Optimization process diagram

2. Исследование влияния параметров V-образного ребра на характеристики теплообмена в канале охлаждения лопатки

2.1. Влияние геометрических параметров на процесс теплоотдачи в канале лопатки

В процессе расчётного исследования процессов теплообмена исследуется множество V-образных рёбер с различными геометрическими параметрами. Для удобства обозначения V-образных ребер используется обозначение, представленное на рис. 10. Например, V-образные рёбра базовой модели лопатки имеют высоту рёбер $e=0,75$ мм, шаг рёбер $P=12$ мм и угол рёбер $\alpha=45^\circ$. Соответствующая модель V-образного ребра – $e0.75P12\alpha45V$.

$$\frac{eX}{\quad} \quad \frac{PY}{\text{---}} \quad \frac{\alpha Z}{\quad} \quad \frac{V}{\text{---}}$$

X- высота ребра (мм); Y- шаг между ребрами (мм); Z - угол наклона ребер, вид ребер - V-образные

Рис. 10. Правила обозначения моделей с V-образным ребром

Fig. 10. Rules for marking models with a V-shaped rib

На основе параметров рёбер охлаждения $e0.75P12\alpha45V$ проведено исследование влияния изменения высоты ребер на число Нуссельта и коэффициента теплоотдачи в канале охлаждения лопатки турбины. В работе проведены расчетные исследования десяти различных моделей рёбер с высотой от 0,3 до 1,65 мм и расстоянием между ними 0,15 мм. На рис. 11 представлены значения среднего числа Нуссельта и суммарного коэффициента теплоотдачи в канале охлаждения лопатки в зависимости от высоты ребер. Из анализа результатов следует, что с увеличением высоты рёбер среднее число Нуссельта и комплексный коэффициент теплоотдачи в канале имеют близкие значения. При увеличении высоты рёбер с 0,3 до 0,45 мм среднее число Нуссельта и суммарный коэффициент теплоотдачи увеличиваются, в диапазоне от 0,6 до 1,2 мм

идёт интенсивный рост. При увеличении высоты рёбер с 1,35 до 1,5 мм происходит постепенное увеличение и выходит на постоянное значение. Таким образом, среднее число Нуссельта в канале охлаждения изменилось с 61,64 до 88,52, увеличившись на 43,61 %, а комплексный коэффициент теплоотдачи увеличился с 0,364 до 0,523, увеличившись на 43,68 %. Аналогичным образом, при условии, что другие геометрические параметры рёбер остаются неизменными, образуется в общей сложности тринадцать различных моделей с расстоянием между рёбрами от 6 до 18 мм с шагом в 1 мм. На рис. 12 показано, как при увеличении шага между рёбрами с 6 до 18 мм среднее число Нуссельта в канале охлаждения лопатки уменьшается с 82,06 до 66,99,

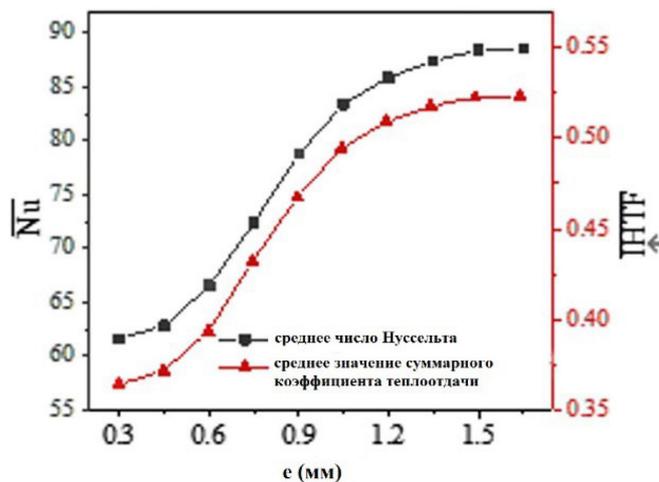


Рис. 11. Среднее значение числа Нуссельта и комплексный коэффициент теплоотдачи для различных по высоте рёбер

Fig. 11. Average value of the Nusselt number and complex heat transfer coefficient for different-height fins

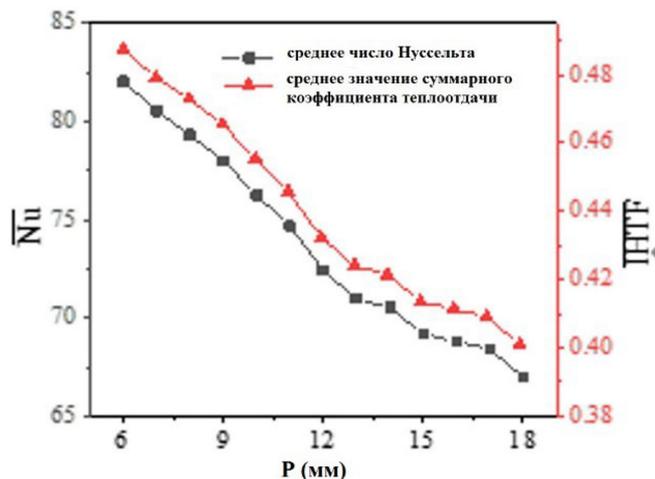


Рис. 12. Среднее значение числа Нуссельта и комплексный коэффициент теплоотдачи при различном шаге между рёбрами

Fig. 12. Average value of the Nusselt number and complex heat transfer coefficient at different steps between the fins

что на 18,36 % меньше, а комплексный коэффициент теплоотдачи уменьшается с 0,487 до 0,401, что соответствует снижению на 17,66 %.

2.2. Оптимизация геометрических параметров V-образных рёбер

Далее были исследованы различные модели расчёта полости охлаждения лопатки, каждая из которых имеет обозначение согласно схеме, представленной на рис. 13.



Рис. 13. Схема обозначения расчётных моделей

Fig. 13. Diagram of calculation models

На данном этапе исследования выполнен расчёт для оптимизации среднего значения числа Нуссельта в канале охлаждения лопатки. Предварительно получены результаты исследования влияния высоты рёбер и расстояния между ними на газодинамические процессы течения и теплопередачу в канале охлаждения. На основании этих данных был выбран диапазон оптимизации высоты ребер от 0,5 до 1,8 мм и диапазон оптимизации расстояния между ребрами от 5 до 18 мм. Математически это выражение может быть записано следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \text{Переменные: } & \left\{ \begin{array}{l} 0.5 \text{ мм} \leq e \leq 1.8 \text{ мм} \\ 5 \text{ мм} \leq P \leq 18 \text{ мм} \end{array} \right\} \\
 \text{Цель: } & \text{Max}(\overline{Nu})
 \end{aligned} \tag{10}$$

На рис. 14 и 15 представлены графики изменения высоты рёбер и расстояния между ними в зависимости от количества шагов расчёта процесса оптимизации по числу Нуссельта. Анализ графиков позволяет сделать вывод, что при увеличении шагов оптимизации высота рёбер и расстояние между ними постепенно приближаются к определённым стабильным значениям. На рис. 16 показано изменение среднего значения числа Нуссельта. Полученная зависимость показывает, что число Нуссельта не увеличивается в процессе оптимизации и в конечном итоге сходится к определённому стабильному значению.

Результат оптимизации числа Нуссельта будет представлен в соответствующем виде:

$$\begin{aligned}
 \text{Переменные: } & \left\{ \begin{array}{l} e = 1.42 \text{ мм} \\ P = 5.98 \text{ мм} \end{array} \right\} \\
 \text{Цель: } & \text{Max}(\overline{Nu}) = 93.80
 \end{aligned} \tag{11}$$

В результате исследования было получено, что предпочтительные характеристики имеет модель ребра: $ePaMaxNu\ e1.42P5.98\alpha45V$. По сравнению с базовой моделью $e0.75P12\alpha45V$ в оптимизированной модели $ePaMaxNu\ e1.42P5.98\alpha45V$ комплексный коэффициент теплоотдачи увеличился с 0,432 до 0,566 (т.е. на 31,02 %).

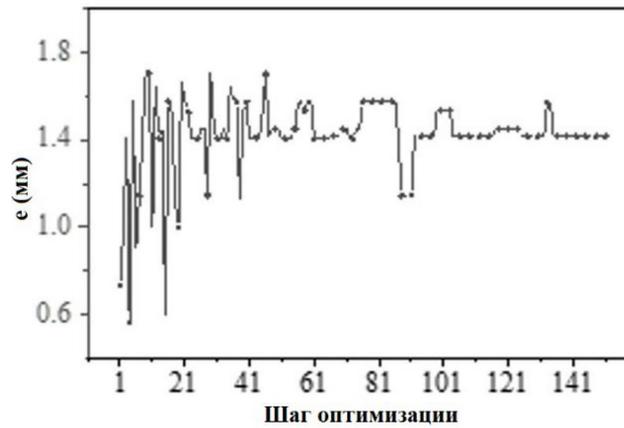


Рис. 14. $e_{\text{P}\alpha\text{MaxNu}}$ характер изменения высоты ребер e в зависимости от шага оптимизации

Fig. 14. $e_{\text{P}\alpha\text{MaxNu}}$ character of the change in the height of the edges e depending on the optimization step

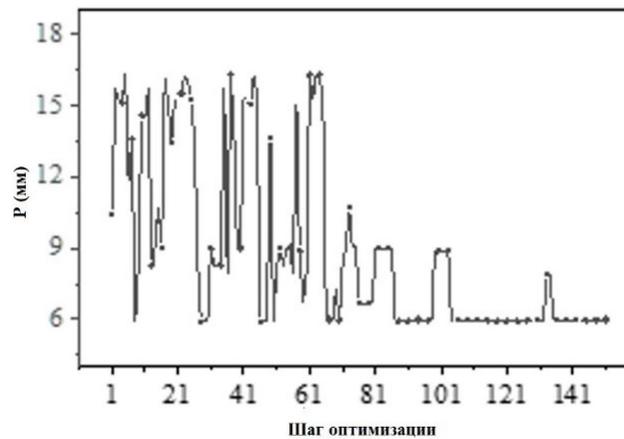


Рис. 15. $e_{\text{P}\alpha\text{MaxNu}}$ характер изменения шага между ребрами p в зависимости от шага оптимизации

Fig. 15. $e_{\text{P}\alpha\text{MaxNu}}$ character of the step change between edges p depending on the optimization step

Основной задачей оптимизации является среднее число Нуссельта в канале охлаждения, и оно отражает общую эффективность теплообмена. Далее было выполнено сравнение и анализ характеристик и параметров теплообмена в оптимизированной и исходной расчетных моделях. На рис. 17 приведено сравнение числа Нуссельта для модели ребра $e_{\text{P}\alpha\text{MaxNu}} e1.42P5.98\alpha45V$ и исходной модели ребра $e0.75P12\alpha45V$. Анализ рис. 17 позволяет сделать вывод, что число Нуссельта в направлении потока охлаждающего воздух оптимизированной модели выше на 20–40 %, чем в базовой модели. На рис. 18 и 19 представлены поля распределений числа Нуссельта в оптимизированной и базовой моделях. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что оптимизированная модель имеет более высокие значения чисел Нуссельта на всех V-образных ребрах. Наибольшее значение числа Нуссельта получается в сечении № 5 на острой кромке, сформированной двумя примыкающими ребрами. Для исходной модели в сечениях с № 6 по 13 число Нуссельта на поверхности V-образного ребра рядом

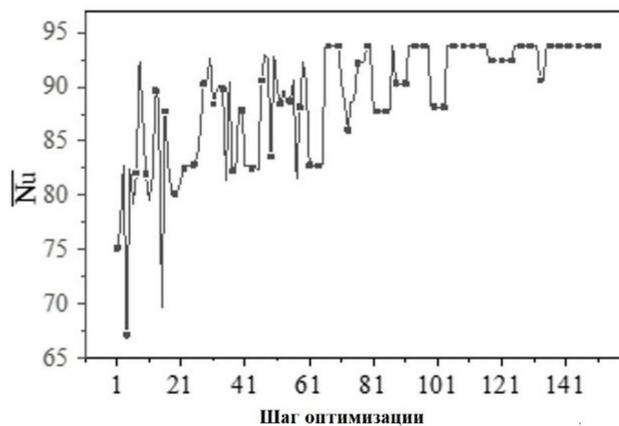


Рис. 16. $e\alpha_{\text{MaxNu}}$ характер изменения среднего значения числа Нуссельта в зависимости от шага оптимизации

Fig. 16. $e\alpha_{\text{MaxNu}}$ character of the change in the average value of the Nusselt number depending on the optimization step

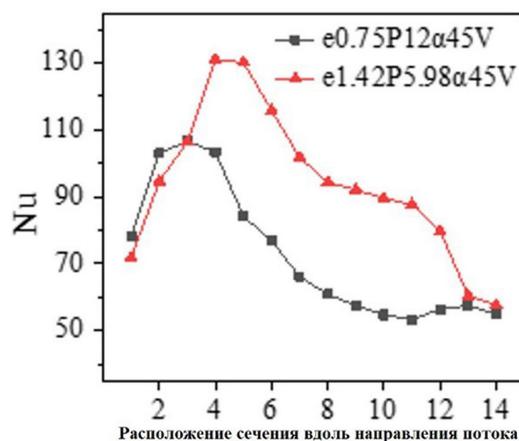


Рис. 17. Изменение значения числа Нуссельта по сечению канала охлаждения

Fig. 17. Change in the Nusselt number across the cooling channel

с хвостовой кромкой выше, а на противоположной поверхности нет области с большим числом Нуссельта. Именно с этим и связаны отличия в характеристиках теплообмена двух моделей лопаток турбины. Основной причиной такого различия является разница в расстоянии между рёбрами оптимизированной модели и базовой модели. Шаг между ребрами в оптимизированной и базовой моделях отличается. В оптимизированной модели он меньше, благодаря чему происходит отрыв потока, что приводит к дополнительной турбулизации потока. В базовой модели имеется большее расстояние между рёбрами (на 10–20 %), поэтому после отрыва воздушного потока на острые ребра он снова прикрепится к стенке в области между верхним и нижним рёбрами, и эффективность теплообмена снижается (на 10–15 %).

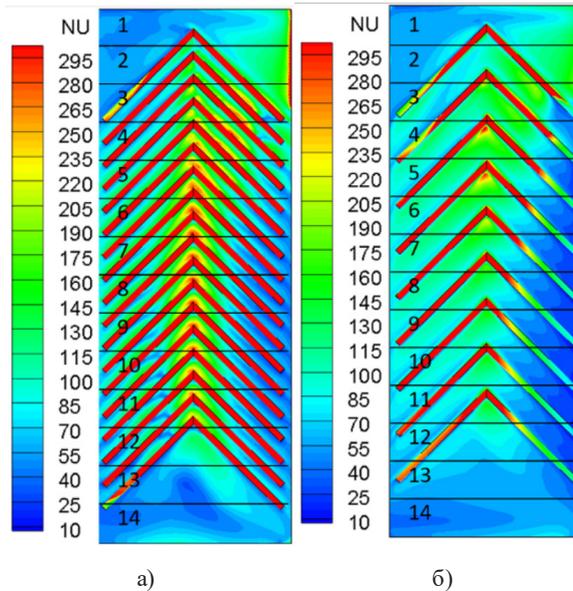


Рис. 18. а) поле распределения значений числа Нуссельта для модели ребра e1.42P5.98 α 45 V; б) поле распределения значений числа Нуссельта для модели ребра e0.75P12 α 45V

Fig. 18. а) distribution field of Nusselt number values for the edge model e1.42P5.98 α 45 V; б) distribution field of Nusselt number knowledge for the edge model e0.75P12 α 45V

Заключение

В ходе выполнения данной работы можно сделать следующие выводы.

1. Соответствующее увеличение высоты рёбер и уменьшение расстояния между ними может интенсифицировать теплообмен ребристой стенки, но в то же время это также увеличит гидравлические потери в канале.

2. Используя число Нуссельта в качестве параметра оптимизации геометрических параметров V-образного ребра, можно отметить, что показатели теплопередачи потока в оптимизированной модели значительно выше, а среднее число Нуссельта на стенке увеличилось на 29,54 % по сравнению с базовой моделью.

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

Список литературы / References

[1] 宋亚军, 李童, 张荻等. 燃气轮机叶片内部扰流肋冷却方式研究进展[J]. 热力透平, 2011, 40(4), 235–244.

SONG Y J, LI T, ZHANG D et al. *Review of Gas Turbine Blade Internal Cooling with Ribs [J]. Thermal Turbine*, 2011, 40(4), 235–244. (in Chinese).

[2] 李磊, 杨子龙, 王佩艳等著. 燃气轮机涡轮冷却叶片设计及优化[M]. 北京: 科学出版社, 2018, 26–30.

LI L, YANG Z L, WANG P Y et al. *Design and optimisation of turbine cooling vanes for gas turbines [M]. BeiJing Science Press*. 2018, 26–30. (in Chinese)

[3] 都萍. 光滑及带扰流片的叶片内部矩形直通道冷却的数值模拟[D]. 大连理工大学, 2004.

- DU P. *Numerical simulation of the cooling of rectangular through channels inside smooth and spoiled blades*[D]. *Dalian University of Technology*,2004, (in Chinese)
- [4] 李希军. 涡轮叶片内部冷却结构的流动与换热特性研究[D]. 南京航空航天大学, 2014.
- LI X J. *Investigation of the flow and heat transfer characteristics of the cooling structure inside a turbine blade*[D]. *Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*,2014 (in Chinese)
- [5] 韩绪军. 涡轮叶片冷却结构参数化及带肋通道优化设计[D]. 哈尔滨工业大学, 2011.
- HAN X J. *Turbine blade cooling structure parameterisation and ribbed channel optimisation*[D]. *Harbin Institute of Technology*,2011 (in Chinese)
- [6] Han J C. *Turbine Blade Cooling Studies at Texas A and M University 1980–2004. journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 2006. 20(2), 161–187
- [7] Han J C. Glicksman L R. Rohsenow W M. *An Investigation of Heat Transfer and friction for Rib-Roughened Surfaces, International Journal of Heat and Mass Transfer*,1978. 21, 114–1156
- [8] Han J C. *Heat Transfer and friction in Channels with Two Opposite Rib-Roughened Walls. Journal of Heat Transfer, Transactions of the ASME*. 1984, 106(4), 774–781
- [9] Han J C. Park J S. Lei C K. *Augmented Heat Transfer in Rectangular Channels of Narrow Aspect Ratios with Rib Turbulators, International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1989. 32(9), 1619–1630
- [10] Han J C. Park J S. *Developing Heat Transfer in Rectangular Channels with Rib Turbulators. International Heat and Mass Transfer*.1988.31, (1), 183–195
- [11] Han J C. Park J S. Lei O K. *Heat Transfer Enhancement in Channels with Turbulence Promoters Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Transactions of the ASME*. 1985, 107(3), 628–635
- [12] Han J C. Chandra P R. Lau S C. *Local Heat/Mass Transfer Distribution around Sharp 180 degree Turns in Two-Pass Smooth and Rib-Roughened Channels, Journal of Heat Transfer. Transactions of the ASME*, 1988. 110. 91–98
- [13] Han J C. Zhang Y M. Lee C P. *Augmented Heat Transfer in square Channels with Parallel. Crossed.And V-Shaped Angled ribs. ASME Journal of Heat Transfer*, 1991. 113, 590–596
- [14] Jia R, Said A. & Sunde'n B. "Heat Transfer Enhancement in Square Ducts With V-Shaped Ribs of Various Angles." *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air*. Volume 3: Turbo Expo 2002, Parts A and B. Amsterdam, The Netherlands. June 3–6, 2002. 469–476.
- [15] Lee E., Wright LM. & Han J. "Heat Transfer in Rotating Rectangular Channels ($AR = 4:1$) With V-Shaped and Angled Rib Turbulators With and Without Gaps." *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2003, collocated with the 2003 International Joint Power Generation Conference*. Volume 5: Turbo Expo 2003, Parts A and B. Atlanta, Georgia, USA. June 16–19, 2003. 661–670. ASME.
- [16] 林爽, 吴榕, 王博等. 涡轮叶片斜肋通道冷态流场特性的实验研究[J]. 浙江大学学报(工学版) 1–10[2022–04–15] Lin Shuang, Wu Rong, Wang Bo, etc. *Experimental Study on the Cold State Flow Field Characteristics of the Diagonal Rib Channel of Turbine Blades [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition)* 1–10[2022–04–15] (in Chinese)

EDN: GQCDGX

УДК 621.3.026.5

The Main Fragment of the Own Magnetic Field of Magnetic Systems of Electrical Devices Is the Spin Magnetic Flux

Valentin D. Pavlov*

*Vladimir Electromechanical Plant
Vladimir, Russian Federation*

Received 05.06.2025, received in revised form 08.11.2025, accepted 14.01.2026

Abstract. It is noted that the spin magnetic flux of an electron, being the basis of the proper magnetic field of ferromagnets, has not yet been established. It is believed that the quantum of magnetic flux is created exclusively by Cooper pairs, that it is half the quantum of F. London and is not associated with the spins of electrons. The purpose of the study is to establish the spin magnetic flux of an electron. The problem here is that the generally accepted concept of electron spin does not allow it to be calculated, which is due to the uncertainty of the electron structure. The task of the work, therefore, is to accept additional temporary (working) assumptions.

Keywords: electron, Cooper pair, quantum of kinetic momentum, quantum of magnetic flux, quantum of F. London, spin, superposition, quasi-quantum.

Citation: Pavlov V. D. The Main Fragment of the Own Magnetic Field of Magnetic Systems of Electrical Devices Is the Spin Magnetic Flux. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(1), 42–48. EDN: GQCDGX



© 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: pavlov.val.75@mail.ru

Основной фрагмент собственного магнитного поля магнитных систем электротехнических устройств – спиновый магнитный поток

В. Д. Павлов

*Владимирский электромеханический завод
Российская Федерация, Владимир*

Аннотация. Отмечено, что спиновый магнитный поток электрона, являясь основой собственного магнитного поля ферромагнетиков, до сих пор не установлен. Считается, что квант магнитного потока создается исключительно куперовскими парами, что он вдвое меньше кванта Φ Лондона и со спинами электронов не связан. Цель исследования заключается в установлении спинового магнитного потока электрона. Проблема при этом заключается в том, что общепринятая концепция спина электрона не позволяет его вычислить, что связано с неопределенностью структуры электрона. Задача работы поэтому состоит в принятии дополнительных временных (рабочих) допущений.

Ключевые слова: электрон, куперовская пара, квант кинетического момента, квант магнитного потока, квант Φ Лондона, спин, суперпозиция, квазиквант.

Цитирование: Павлов В. Д. Основной фрагмент собственного магнитного поля магнитных систем электротехнических устройств – спиновый магнитный поток / В. Д. Павлов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(1). С. 42–48. EDN: GQCDGX

Актуальность работы определяется тем, что спиновый магнитный поток электрона, являясь основой собственного магнитного поля ферромагнетиков [1–5], до сих пор не установлен.

В 1948 г. Ф. Лондон вычислил квант магнитного потока от электрического тока, созданного одним электроном. Ключевым условием вычисления явилось приписывание электрону кванта кинетического момента \hbar .

В 1956 г. Л. Купер описал двухчастичные системы коррелированных электронов (куперовские пары), возникающие в проводниках вследствие электрон-фононного взаимодействия [6]. Приписывание двухчастичной системе кванта кинетического момента \hbar приводит к уменьшению вычисляемого значения кванта магнитного потока вдвое.

Ни Ф. Лондон, ни Л. Купер в своих расчетах не учитывали магнитные потоки, обусловленные спинами электронов.

В 1961 г. Б. С. Дивер и У. М. Фэрбэнк и независимо Р. Долл и М. Небауэр измерили квант магнитного потока. Результат оказался вдвое меньше кванта Φ Лондона.

С тех пор считается, что квант магнитного потока создается исключительно куперовскими парами, что он вдвое меньше кванта Φ Лондона и со спинами электронов не связан.

Цель исследования состоит в установлении спинового магнитного потока электрона.

Проблема при этом заключается в том, что общепринятая концепция спина электрона не позволяет его вычислить, что связано с неопределенностью структуры электрона.

Задача работы поэтому состоит в принятии дополнительных временных (рабочих) допущений.

**Первый вывод формулы для кванта магнитного потока,
обусловленного спином электрона**

Геометрическая форма электрона неизвестна. Однако считается, что это не шар и не сфера. Это следует из формулы его классического радиуса

$$r_e = \frac{\mu_0 e^2}{4\pi m_e}.$$

Здесь μ_0 – постоянная магнитная, e – заряд электрона, m_e – масса электрона.

В случае шара формула имела бы вид:

$$r_e = \frac{3}{5} \frac{\mu_0 e^2}{4\pi m_e}.$$

В случае сферы формула имела бы вид:

$$r_e = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 e^2}{4\pi m_e}.$$

Полная неопределенность формы электрона позволяет непротиворечиво представить его спин в виде момента импульса, образованного материальной точкой с массой электрона, обращающейся по окружности неопределенного радиуса (сколь угодно малого, причем его величина значения не имеет; предложенное допущение не рассматривается в качестве конкурирующего по отношению к известным описаниям спина электрона, например, в работах Белинфанте или [7]). Этот подход может иметь недостатки, но он имеет и существенное достоинство в виде возможности использовать готовую формулу для магнитного потока, созданного «током» одного электрона, полученную в [8] по схеме:

$$\begin{aligned} E &= \frac{I\Phi}{2}, \\ I &= \frac{e}{T}, \\ T &= \frac{2\pi R}{v}, \\ E &= \frac{m_e v^2}{2}, \\ \Phi &= \frac{2\pi R m_e v}{e}. \end{aligned}$$

Окончательно

$$\Phi = \frac{2\pi R p}{e}. \quad (1)$$

Здесь E – энергия, I – ток электрона, T – период обращения электрона, R – радиус лабораторной трубки (в опытах Б.С. Дивера, У.М. Фэрбэнка, Р. Долла и М. Небауэра), v – линейная скорость единичного электрона, p – импульс единичного электрона.

Спин электрона равен

$$L_{es} = \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar. \quad (2)$$

С учетом (1) квант магнитного потока, обусловленного спином электрона, равен

$$\Phi_{es} = \frac{2\pi R p}{e} = \frac{2\pi L_{es}}{e} = \frac{2\pi \sqrt{3}}{e} \frac{\hbar}{2}.$$

Окончательно

$$\Phi_{es} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\hbar}{e}. \quad (3)$$

Замечание 1. Классический радиус (r_e) в выкладках статьи не используется и поэтому на результаты не влияет. Упомянут исключительно для иллюстрации неопределенности формы электрона.

Замечание 2. Выбирать R для формулы (1) не приходится. В полученную формулу (3) для спинового кванта магнитного потока радиус не входит («растворился» в спине). Поэтому его величина значения не имеет. По крайней мере, вполне можно считать, что он достаточно большой, чтобы не развивалась чрезмерная энергия.

Экспериментальная верификация спинового кванта магнитного потока

Круговой ток в лабораторной трубке, образованный одним электроном, создает магнитный поток

$$\Phi_L = \frac{2\pi \hbar}{e} = \frac{\hbar}{e}. \quad (4)$$

Это формула Ф. Лондона [9].

Спин электрона может иметь лишь две проекции на направление магнитного поля потока (4), а именно:

$$L_{esB} = \pm \frac{\hbar}{2}.$$

В силу закона сохранения момента импульса спин противоположен орбитальному моменту. Поэтому

$$L_{esB} = -\frac{\hbar}{2}.$$

Следовательно, магнитный поток, обусловленный спином электрона, вычитается из потока (4) (его проекция).

Таким образом, в 1961 г. Б. С. Дивер, У. М. Фэрбэнк, Р. Долл и М. Небауэр измерили орбитальный квант магнитного потока ОДНОГО электрона за вычетом проекции спинового кванта магнитного потока (через торцевые поверхности их лабораторных трубок)

$$\frac{\hbar}{e} - \frac{\hbar}{2e} = \frac{\hbar}{2e}. \quad (5)$$

Это квазиквант, а не квант от куперовской пары

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e}. \quad (6)$$

Совпадение измеренного значения (5) с (6) является совершенно случайным.

Однако это совпадение является надежной экспериментальной верификацией формул (1), (3)–(5) и принятого допущения о спине электрона.

Второй вывод формулы для кванта магнитного потока, обусловленного спином электрона

И квант магнитного потока Φ . Лондона (4), и квант от куперовской пары (6) представимы в виде

$$\Phi_q = \frac{h}{q} = \frac{2\pi\hbar}{q}.$$

Окончательно

$$\Phi_q = \frac{2\pi}{q} L_q,$$

где q – заряд, L_q – квант кинетического момента.

Подстановка в эту формулу заряда электрона и его кинетического момента (спина) (2) непосредственно дает

$$\Phi_{es} = \frac{2\pi}{q} L_q = \frac{2\pi}{e} \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar.$$

Окончательно

$$\Phi_{es} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{h}{e}.$$

Совпадает с (3), что также является надежной верификацией формул (1), (3)–(5) и принятого допущения о спине электрона.

Заключение

В [10] подробно показано, что приписывание куперовской паре электронов кванта \hbar кинетического момента является неприемлемым. Поэтому в такой же степени неприемлемой является связанная с этим формула для кванта магнитного потока от куперовской пары (6).

В действительности существуют квант Φ . Лондона (4), квант магнитного потока (3), обусловленный спином электрона, и их суперпозиция (5) (квазиквант).

Его (квазиквант) и измерили в 1961 г.

Спиновый магнитный поток электрона равен

$$\Phi_{es} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{h}{e}.$$

Именно он является основой собственного магнитного поля ферромагнетиков.

При этом принятые в работе допущения о спине электрона не отразились на окончательном результате и поэтому могут считаться временными (рабочими) и не противопоставляться общепринятой концепции спина.

Список литературы / References

[1] Биронт В.С., Блохин И.В. Некоторые особенности фазовых превращений в системе железо-углерод. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*, 2009, 2(3), 238–249 [Biront V. S., Blokhin I. V. Some features of phase transformations in the iron-carbon system. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2009, 2(3), 238–249 (in Russian)]

[2] Ачитаев А.А., Бархатов К.А., Удалов С.Н. Управление ветроэнергетической установкой с синхронным генератором на постоянных магнитах и магнитным вариатором. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*, 2021, 14(1), 72–96 DOI: 10.17516/1999–494X-0289 [Achitaev A. A., Barkhatov K. A., Udalov S. N. Control of a wind power plant with a synchronous generator on permanent magnets and a magnetic variator. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2021, 14(1), 72–96 DOI: 10.17516/1999–494X-0289 (in Russian)]

[3] Тимофеев В.Н., Хацаюк М.Ю., Хоменков П.А., Тимофеев Н.В., Михайлов Д.А. Энергоэффективные индукторы магнитогидродинамических устройств металлургического назначения. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*, 2024, 17(8), 1035–1046 [Timofeev V. N., Khatsayuk M. Yu., Khomenkov P. A., Timofeev N. V., Mikhailov D. A. Energy-efficient inductors of magnetohydrodynamic devices for metallurgical purposes. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2024, 17(8), 1035–1046 (in Russian)]

[4] Burmitskikh A.V., Boev N.M., Negodeeva I.A., Andyuseva V.G. Thin magnetic film magnetometer. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2025, 18(1), 96–100.

[5] Целюк Д.И., Жукова В.Е., Ожогина Е.Г., Якушина О.А., Целюк И.Н. Минералогические особенности хвостов мокрой магнитной сепарации железных руд и перспективы извлечения из них железа. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*, 2013, 6(4), 412–424 [Tselyuk D. I., Zhukova V. E., Ozhogina E. G., Yakushina O. A., Tselyuk I. N. Mineralogical and technological features of tailings from wet magnetic separation of iron ores and prospects for extracting iron from them. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2013, 6(4), 412–424 (in Russian)]

[6] Павлов В.Д. О моменте импульса куперовской пары электронов и кванте магнитного потока. *Прикладная физика и математика*, 2024, (4), 12–16. DOI: 10.25791/pfi m.04.2024.1301 [Pavlov V. D. On the angular momentum of a Cooper pair of electrons and the quantum of magnetic flux. *Applied Physics and Mathematics*, 2024, (4), 12–16. DOI: 10.25791/pfi m.04.2024.1301 (in Russian)]

[7] Попов И.П. Размер электрона с учетом спина. *Инженерная физика*, 2016, (9), 45–46 [Popov I. P. Electron size taking into account spin. *Engineering Physics*, 2016, (9), 45–46 (in Russian)]

[8] Pavlov V. D. On the electronic quantum structures of conductors. *Physics of Complex Systems*, 2025, 6(1), 49–53. DOI: 10.33910/2687–153X-2025–6–1–49–53

[9] Павлов В.Д. Магнитный поток и его квантование. *Известия Уфимского научного центра РАН*, 2020, (4), 25–28. DOI: 10.31040/2222-8349-2020-0-4-25-28 [Pavlov V. D. Magnetic flux and its quantization. *Bulletin of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2020, (4), 25–28. DOI: 10.31040/2222-8349-2020-0-4-25-28 (in Russian)]

- [10] Попов И.П. Двойные стандарты при описании атомов гелия и позитрония. *Вестник Томского государственного университета. Химия*, 2024, (35), 143-151. DOI: 10.17223/24135542/35/11
[Popov I.P. Double standards in the description of helium and positronium atoms. *Bulletin of Tomsk State University. Chemistry*, 2024, (35), 143-151. DOI: 10.17223/24135542/35/11 (in Russian)]

EDN: BQSZAA

УДК 621.311: 621.331

Modeling of Electromagnetic Fields of a Gas-Insulated Line Supplying Traction Substations

Andrey V. Kryukov^a,
Konstantin V. Suslov^{b*}, Dmitrij A. Sereдкин^a,
Ekaterina V. Voronina^a and Andrey G. Batukhtin^c

^a*Irkutsk State Transport University
Irkutsk, Russian Federation*

^b*National Research University “MPEI”
Moscow, Russian Federation*

^c*Transbaikal State University
Chita, Russian Federation*

Received 01.11.2025, received in revised form 08.11.2025, accepted 14.01.2026

Abstract. Traditionally, AC power is supplied to railway traction substations from 110–220 kV overhead power lines, which are susceptible to damage during strong winds and ice formation. Furthermore, these transmission lines generate significant electromagnetic fields, adversely affecting maintenance personnel, the public, and the environment. To mitigate the resulting damage, protective zones requiring significant land allocations are necessary. Improving the reliability of traction substation power supply and reducing electromagnetic field levels can be achieved by using gas-insulated lines (GIL), the use of which in the power industry in many countries is steadily increasing. The objective of the research presented in this article was to develop computer models for determining the electromagnetic fields of a GIL supplying a group of traction substations, taking into account the actual traction load, characterized by non-sinusoidality and asymmetry. To solve this problem, an approach implemented in the Fazonord AC-DC software package and based on the use of phase coordinates was used. This allowed for the accurate consideration of the skin and proximity effects in the massive current-carrying parts of the GIL, as well as the effects of asymmetry and harmonic distortion. Modeling results showed that the use of GILs resulted in voltage asymmetry factors on the 110 kV traction substation busbars being within the permissible range, with maximum negative-sequence asymmetry factors not exceeding 2 %. Harmonic distortion determinations revealed a significant reduction in harmonic distortion factors in the 110 kV network for GILs compared to overhead power lines. Electromagnetic field calculations confirmed that GILs generate magnetic field strengths an order of magnitude lower than those of overhead power lines. These results suggest the high efficiency of using gas-insulated lines for powering traction substations, ensuring increased reliability, improved power quality, and

© 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: dr.suslov@yandex.ru

reduced negative impacts of electromagnetic fields on personnel, the public, the environment, and electronic equipment.

Keywords: gas-insulated and overhead power lines, traction substations, electromagnetic field, modeling.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. 123102000012–2), agreement No. 075–03–2023–028/1 dated 05.10.2023.

Citation: Kryukov A. V., Suslov K. V., Seredkin D. A., Voronina E. V., Batukhtin A. G. Modeling of Electromagnetic Fields of a Gas-Insulated Line Supplying Traction Substations. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(1), 49–63. EDN: BQSZAA



Моделирование электромагнитных полей газоизолированной линии, питающей тяговые подстанции

А. В. Крюков^а, К. В. Суслов^б,
Д. А. Середкин^а, Е. В. Воронина^а, А. Г. Батухтин^в

^а *Иркутский государственный университет путей сообщения
Российская Федерация, Иркутск*

^б *Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Российская Федерация, Москва*

^в *Забайкальский государственный университет
Российская Федерация, Чита*

Аннотация. Электроснабжение тяговых подстанций (ТП) железных дорог переменного тока традиционно осуществляется от воздушных линий (ВЛ) электропередачи (ЛЭП) 110–220 кВ, которые могут повреждаться при сильных ветрах и образовании гололеда. Кроме того, эти ЛЭП создают значительные электромагнитные поля (ЭМП), неблагоприятно влияющие на обслуживающий персонал, население и окружающую среду. Для снижения возникающих ущербов необходима организация защитных зон, требующих значительных землеотводов. Повышение надежности обеспечения ТП электроэнергией и уменьшение уровней ЭМП может быть достигнуто на основе газоизолированных линий (ГИЛ), применение которых в электроэнергетике многих стран мира непрерывно возрастает. Цель представленных в статье исследований состояла в разработке компьютерных моделей, обеспечивающих определение ЭМП ГИЛ, питающих группу ТП, с учетом реальных тяговых нагрузок, характеризующихся несинусоидальностью и несимметрией. Для решения этой задачи применялся подход, реализованный в программном комплексе Fazonord AC-DC и базирующийся на использовании фазных координат. Это позволило корректно учитывать поверхностный эффект и эффект близости в массивных токоведущих частях ГИЛ, а также влияние несимметрии и гармонических искажений. Результаты моделирования показали, что применение ГИЛ приводит к вводу коэффициентов несимметрии напряжений на шинах 110 кВ тяговых подстанций в допустимый диапазон, при этом максимальные значения этих коэффициентов не превышали 2 %. Результаты определения гармонических искажений показали значительное снижение коэффициентов гармоник в сети 110 кВ для ГИЛ по сравнению с ВЛ. Проведенные расчеты электромагнитных полей подтвердили, что ГИЛ создает напряженности магнитного поля, на порядок меньшие по сравнению с ВЛ. Полученные результаты позволяют сделать вывод о высокой эффективности применения для электроснабжения тяговых подстанций

газоизолированных линий, обеспечивающих повышение надежности, улучшение качества электроэнергии и снижение негативного воздействия ЭМП на персонал, население, окружающую среду и электронное оборудование.

Ключевые слова: газоизолированные и воздушные ЛЭП, тяговые подстанции, электромагнитное поле, моделирование.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 123102000012–2), соглашение № 075–03–2023–028/1 от 05.10.2023 г.

Цитирование: Крюков А. В. Моделирование электромагнитных полей газоизолированной линии, питающей тяговые подстанции / А. В. Крюков, К. В. Суслов, Д. А. Середкин, Е. В. Воронина, А. Г. Батухтин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(1). С. 49–63. EDN: BQSZAA

Введение

Воздушные линии (ВЛ) 110–220 кВ широко применяются для присоединения тяговых подстанций к сетям электроэнергетических систем (ЭЭС). Такой подход имеет целый ряд недостатков, наиболее критичными из которых являются следующие факторы:

- при сильных ветрах и гололеде могут обрываться провода и повреждаться опоры;
- при падении проводов на землю возникают шаговые напряжения, опасные для людей и животных;
- на трассах ВЛ создаются электромагнитные поля со значительными уровнями напряженностей, негативно влияющие на обслуживающий ЛЭП персонал, население и окружающую среду; поэтому для снижения возникающих ущербов приходится организовывать защитные зоны, требующие больших землеотводов.

Возможным решением задачи повышения надежности электроснабжения ТП и улучшения условий электромагнитной безопасности является применение кабельных или газоизолированных линий (рис. 1). Преимущества ГИЛ заключаются в компактности, высокой надежности и пониженных уровнях создаваемых ЭМП.

Актуальность проблемы изучения различных аспектов, связанных с моделированием газоизолированных линий, подтверждается большим числом публикаций, посвященных этой тематике. Так, например, анализ теплопередачи для ГИЛ с изоляцией SF_6/N_2 выполнен в [1]. В данной работе с помощью метода конечных элементов анализировались процессы теплопередачи с использованием трехмерной осесимметричной модели. На этой основе получены зависимости между соотношением компонентов смеси SF_6/N_2 и температурой. Кроме того, варьировались давления газа, токи в линии и температура окружающей среды. Полученные результаты могут применяться при выборе оптимального соотношения смеси SF_6/N_2 . Сравнение ГИЛ 400 кВ с традиционной воздушной ЛЭП проведено в [2]. Показано, что ГИЛ могут использоваться для передачи электроэнергии на большие расстояния. Сравнивались такие показатели, как пропускная способность и потери мощности. Полученные результаты показали значительные преимущества ГИЛ.

Сравнение пропускной способности и потерь при передаче потоков мощности по воздушным и элегазовым ЛЭП проведено в [3]. Показано, что в мегаполисах, где полосы отвода для воздушных линий (ВЛ) ограничены, проблемы транспорта электроэнергии могут быть реше-

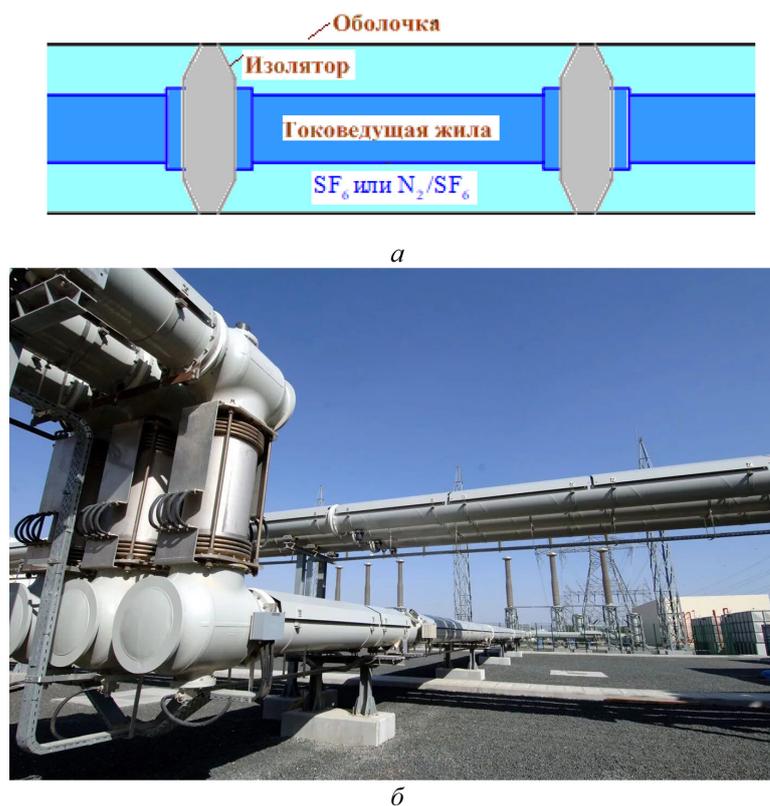


Рис. 1. Конструкция фазы (а) и фото ГИЛ (б)

Fig. 1. Phase design (a) and GIL photo (b)

ны на основе ГИЛ. Проведены расчеты для ГИЛ и ВЛ с напряжением 220, 400, 765 и 1100 кВ. Приведены сравнительные данные по пропускной способности, а также потерям мощности и напряжения. Результаты измерений характеристик электромагнитной среды на трассе ГИЛ переменного тока сверхвысокого напряжения представлены в [4]. Рассматривались следующие характеристики: напряженности электромагнитного поля, радиопомехи и акустический шум. Измерения проводились при различных значениях токов и напряжений. Анализ полученных данных показал, что электромагнитная обстановка на трассе ГИЛ соответствует нормативным требованиям.

Задача повышения эффективности экранирования газоизолированного токопровода от электромагнитных полей, возникающих во время коммутационных операций в распределительном устройстве с газовой изоляцией, решена в [5]. Показано, что проблема получения характеристик переходных ЭМП, генерируемых в элегазовой подстанции во время коммутационных операций, приобрела в последние годы особую актуальность. Это связано с широким использованием чувствительных электронных устройств в схемах управления таких подстанций. Авторами разработана численная модель, основанная на методе конечных разностей, для расчета ЭМП элегазового токопровода во время коммутационных операций. Эффективность экранирования оценивалась с использованием источника синусоидального тока. Кроме того, рассчитаны уровни ЭМП от сверхбыстрых переходных токов. Вопросы моделирования маг-

нитных полей вблизи мест пересечения газоизолированных линий электропередачи рассмотрены в [6]. Показано, что ГИЛ благодаря своей компактности создают альтернативу воздушным линиям в условиях ограниченного пространства, например в густонаселенных районах. Поэтому важно рассмотреть вопрос о магнитных полях промышленной частоты, генерируемых ГИЛ, из-за опасений, что их воздействие может неблагоприятно влиять на население. Авторами решена задача моделирования ЭМП вблизи точки пересечения двух ГИЛ. Исследовано влияние угла пересечения, вертикального расстояния между линиями, фазировки и нагрузки линий на магнитные поля.

Результаты исследования ЭМП ГИЛ 500 кВ, полученные на основе моделирования, представлены в [7]. Показано, что в современных условиях ГИЛ получили широкое распространение благодаря большой пропускной способности, низкому воздействию на окружающую среду и высокой надежности. Точное моделирование ГИЛ и получение их характеристик обеспечит теоретическую основу для проектирования и эксплуатации, что позволит повысить безопасность и надежность работы. Предложена математическая модель для анализа электромагнитных и тепловых полей ГИЛ. Вопросы использования газоизолированных линий на трассах инженерных сооружений рассмотрены в [8]. К таким сооружениям относятся следующие объекты: железнодорожные галереи, автомобильные дороги и газопроводы. Высокая мощность ГИЛ в сочетании с низкими потерями делает эти объекты высокоэффективными коридорами передачи электроэнергии. Задача расчета магнитного поля (МП) ГИЛ, проложенных в туннеле, решена в [9–11]. Приведены результаты определения напряженностей МП, создаваемого двухцепными ГИЛ, смонтированными в туннеле. Расчеты выполнены применительно к железнодорожной линии Больцано-Инсбрук между Италией и Австрией. Проанализировано МП внутри и снаружи туннеля с целью оптимизации чередования фаз. При расчетах учитывался эффект близости.

Компактные линии электропередачи переменного тока с газовой изоляцией рассмотрены в [12]. Технология элегазовых ЛЭП переменного тока для подземной передачи больших мощностей находит все большее применение во всем мире и обеспечивает рациональное решение для подземных установок. Для повышения уровня эффективности прокладки ГИЛ предлагается использовать мобильные заводы, оборудованные машинами для высококачественной сварки оболочки и токопроводящих труб; при этом эффективность прокладки увеличивается на 20...30 %. Вопросы применения ГИЛ для передачи больших мощностей на дальние расстояния рассмотрены в [13]. Показано, что подземная передача электроэнергии на значительные расстояния с помощью ГИЛ экономична. Технология обладает следующими преимуществами по сравнению с традиционными кабелями: высокая пропускная способность (3000 МВ·А и более); возможность передачи на большие расстояния без компенсации реактивной мощности (100 км и более).

Линии электропередачи постоянного тока (ПТ) с элегазовой изоляцией описаны в [14]. ГИЛ ПТ использует алюминиевый проводник и ограждающие трубы большого сечения для токов до 5000 А и напряжения ± 550 кВ. Технология сборки и монтажа линии ГИЛ ПТ в высокой степени автоматизирована благодаря мобильному заводу и технологии сварки трением с перемешиванием, обеспечивающей быстрое и безопасное соединение алюминиевых труб. Задача измерения коэффициента диэлектрических потерь в ГИЛ с использованием низкочастотного

испытания решена в [15]. Измерение тангенса дельта на сверхнизкой частоте является одним из методов диагностики изоляции, обычно используемых для диагностики состояния электрических кабелей. Для экспериментов была подготовлена однофазная ГИЛ напряжением 230 кВ и током 2500 А. Эксперименты были разделены на пять групп, классифицированных по типу дефектов. Для каждого типа были измерены коэффициенты диэлектрических потерь.

Анализ традиционных и гибких ГИЛ при прокладке методом горизонтально-направленного бурения в городских районах проведен в [16]. Показано, что ГИЛ используются в качестве эффективной альтернативы подземным кабелям и воздушным линиям электропередачи. Однако при прокладке ГИЛ традиционной металлической конструкции возникают трудности при соединениях элементов из-за структурной жесткости, а также экологические ограничения из-за возможной утечки элегаза SF_6 в случае сейсмических событий. Авторами разработана гибкая ГИЛ и проведено ее сравнение с обычной линией. Результаты моделирования показали, что предлагаемая ГИЛ может привести к существенному снижению минимального радиуса изгиба и требуемой площади для прокладки. Кроме того, гибкость облегчит процедуру монтажа с использованием горизонтально-направленного бурения. Данная конструкция ГИЛ может устранить необходимость в защите от коррозии, что может быть полезным для внедрения подземных ГИЛ в городских районах. Технические аспекты элегазовых ЛЭП и возможности применения новых изоляционных газов рассмотрены в [17]. Представлена информация о проектировании, испытаниях и многолетнем опыте эксплуатации линий ГИЛ переменного тока. В настоящее время для ГИЛ используются чистый элегаз SF_6 и газовые смеси N_2/SF_6 и проводятся исследования по применению альтернативных газов для изоляции.

Анализ представленных выше работ позволяет сформулировать следующие выводы:

- задача моделирования ГИЛ имеет несомненную актуальность и является основой для их эффективного применения в современных ЭЭС;
- авторами рассмотренных в обзоре публикаций предложены эффективные методы моделирования ГИЛ.

Значительная часть электрических сетей России, особенно в регионах Сибири и Дальнего Востока, примыкают к тяговым подстанциям магистральных железных дорог; при этом однофазные тяговые сети (ТС) оказывают значительное влияние на их режимы. Однако вопросы учета этого фактора в описанных выше публикациях не рассмотрены. Для решения этой задачи можно использовать подход, основанный на мультифазном представлении элементов ЭЭС, предложенный в [18–22].

Методика и результаты моделирования

Далее представлены результаты исследований, направленных на разработку компьютерных моделей ЭЭС, питающих тяговые подстанции, для подключения которых применялись ГИЛ.

В газоизолированной линии используются массивные токоведущие части цилиндрического сечения; при этом каждая фаза помещается в алюминиевую оболочку, выполняющую функцию экрана. В такой конструкции заметно проявляются поверхностный эффект и эффект близости, что значительно усложняет моделирование.

Для решения поставленных задач применяется подход, представленный в [18–22]. Он реализован в промышленном программном комплексе Fazonord AC-DC [18, 19] и базируется

на использовании фазных координат, что позволяет корректно учитывать поверхностный эффект и эффект близости в массивных токоведущих частях ГИЛ, а также моделировать режимы ЭЭС с учетом несимметрии и гармонических искажений, создаваемых тяговыми нагрузками. На его основе возможно решение задач проектирования и эксплуатации электроэнергетических систем и тяговых сетей железных дорог переменного и постоянного токов (рис. 2).

Осуществлялось моделирование режимов электрической сети 110 кВ, питающей группу ТП (рис. 3). Для этого в ПК Fazonord AC-DC были разработаны две модели. В первой из них сеть 110 кВ, питающая ТП, была реализована на основе ГИЛ. Во второй использовались воздушные линии. Тяговые нагрузки создавались путем имитации движения поездов массой 4384 и 6780 тонн по реальному профилю пути.

Для корректного учета поверхностного эффекта и эффекта близости моделирование массивных токоведущих частей ГИЛ проводилось наборами проводов, суммарное сечение которых соответствовало фактическому сечению экрана или жилы ГИЛ (рис. 4). Экраны ГИЛ были заземлены на каждом участке с двух сторон.

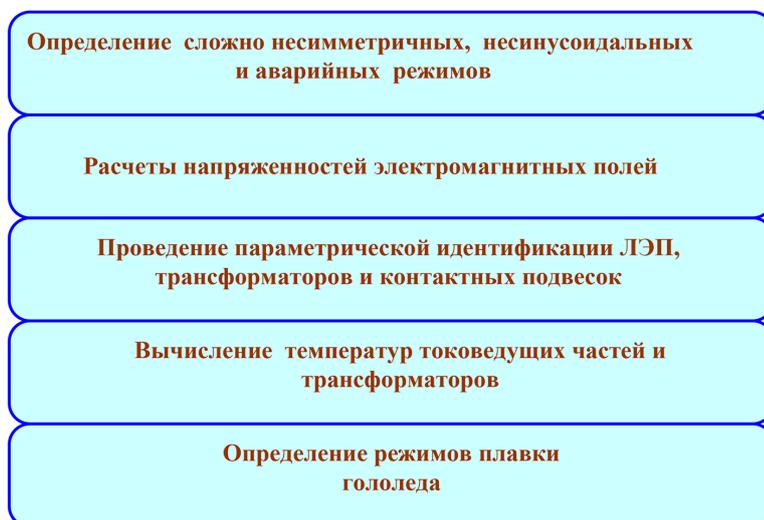


Рис. 2. Группы решаемых задач

Fig. 2. Groups of Solvable Tasks

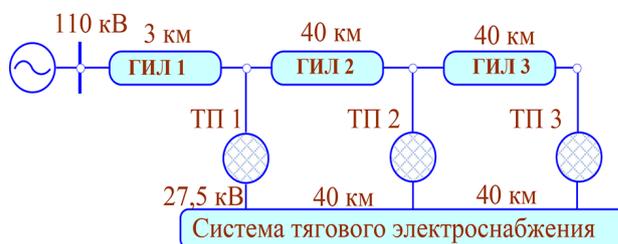


Рис. 3. Схема моделируемой сети

Fig. 3. Scheme of the simulated network

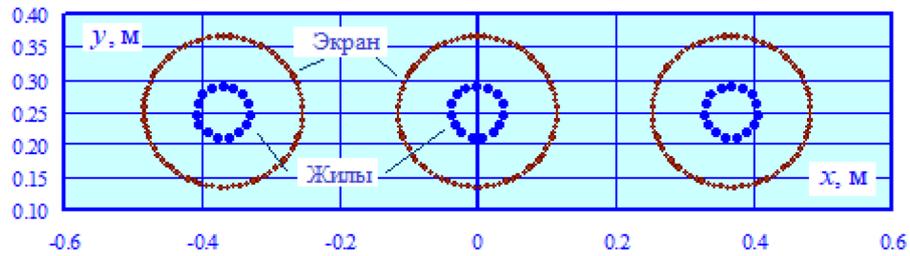


Рис. 4. Расположение токоведущих частей ГИЛ

Fig. 4. Location of GIL current-carrying parts

Результаты моделирования представлены на рис. 5–8. На рис. 5 показано распределение токов по токоведущим частям ГИЛ, полученное с учетом поверхностного эффекта и эффекта близости.

Полученные в результате моделирования максимальные и средние значения k_{2U} представлены в табл. 1. Зависимости $I_{\Sigma} = I_{\Sigma}(t)$, $P = P(t)$, $\Delta P = \Delta P(t)$ показаны на рис. 6. Зависимости напряжений $U = U(t)$ и коэффициентов несимметрии k_{2U} от времени представлены на рис. 7. Здесь I_{Σ} – суммарные токи, потребляемые группой ТП; P – переток мощности по головной ЛЭП, МВт; ΔP – потери мощности в этой ЛЭП, кВт; U – фазные напряжения на шинах 110 кВ ТП 3.

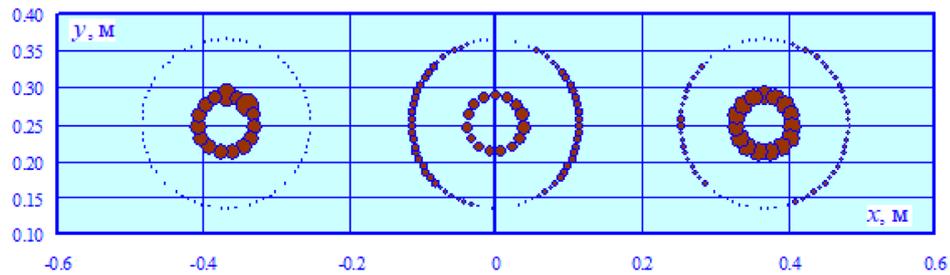
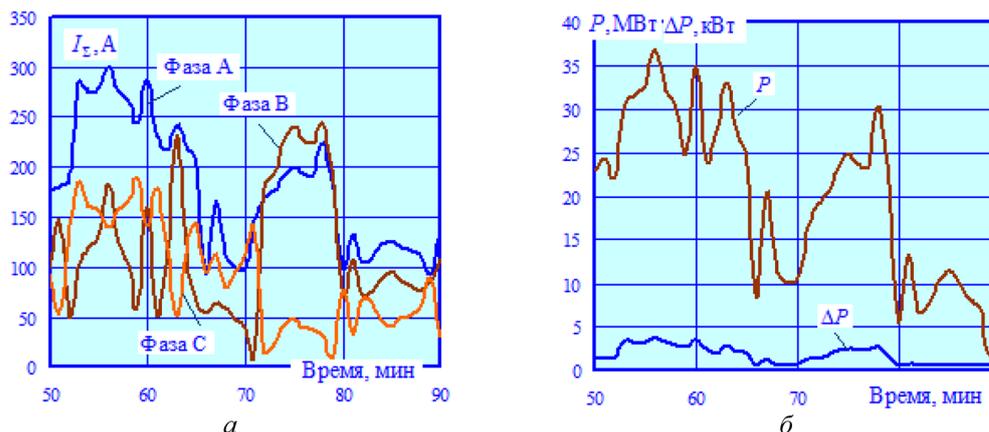
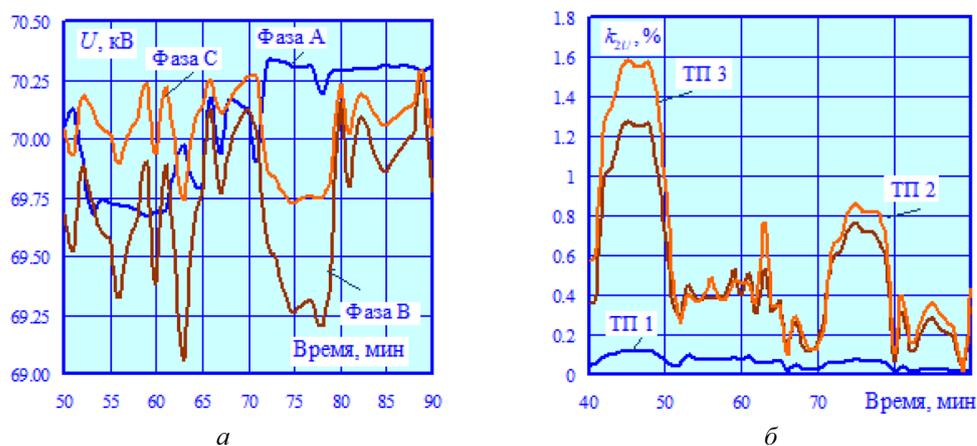


Рис. 5. Распределение токов в ГИЛ: размеры «пузырьков» диаграммы пропорциональны величинам протекающих токов

Fig. 5. Current distribution in GIL: the sizes of the diagram “bubbles” are proportional to the values of the flowing currents

Таблица 1. Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности k_{2U} на шинах 110 кВ ТПTable 1. Negative-sequence unbalance coefficients k_{2U} on 110 kV traction substation buses, %

Подстанция	ГИЛ		ВЛ		Различие, %	
	Ср. значение	Максимум	Ср. значение	Максимум	Между столбцами 4 и 2	Между столбцами 5 и 3
1	2	3	4	5	6	7
ТП1	0,05	0,12	0,16	0,28	69	57
ТП2	0,36	1,28	1,73	3,79	79	66
ТП3	0,45	1,58	2,19	4,8	79	67

Рис. 6. Зависимости $I_{\Sigma} = I_{\Sigma}(t)$ (а) и $P = P(t)$; $\Delta P = \Delta P(t)$ (б) в сети с ГИЛFig. 6. Dependencies $I_{\Sigma} = I_{\Sigma}(t)$ (a) and $P = P(t)$; $\Delta P = \Delta P(t)$ (b) in a network with GILРис. 7. Зависимости $U = U(t)$ (а) и $k_{2U} = k_{2U}(t)$ (б) в сети с ГИЛFig. 7. Dependencies $U = U(t)$ (a) and $k_{2U} = k_{2U}(t)$ (b) in the network with GIL

Из анализа данных, приведенных в табл. 1 и на рис. 6, 7, можно сделать следующие выводы:

- существенные вариации тяговых нагрузок, вызванные движением грузовых поездов по участку со сложным профилем пути, приводят к заметным изменениям токов I_{Σ} , перетоков P и потерь мощности ΔP . Отвечающие этим параметрам коэффициенты вариации k_{VAR} равны: для токов отдельных фаз 36...57 % (причем наибольшая величина наблюдается для фазы С, а наименьшая для фазы А); для перетоков 48 %, а для потерь – 59 %;
- в схеме с ГИЛ средние значения k_{2U} на 69...79 % ниже аналогичных показателей для сети с ВЛ;
- уровни напряжения в сети с ГИЛ отличаются большей стабильностью по сравнению с токами, мощностями и потерями; k_{VAR} лежат в диапазоне 0,24...0,36 %; однако параметр k_{2U}

изменяется в широких пределах, особенно для ТП 2 и 3.; на рис. 7а показаны графики $U = U(t)$, вычисленные на приемном конце ГИЛ 3.

На рис. 8 и в табл. 2 отражены результаты моделирования несинусоидальных режимов. Представленные данные дают возможность сформулировать следующие выводы:

- в сети с ГИЛ максимумы суммарных коэффициентов гармоник на 72...88 % ниже, чем в схеме с ВЛ;
- средние значения коэффициентов гармоник тока выше аналогичных показателей для напряжения в 31...59 раз;
- коэффициенты k_{VAR} для гармоник напряжения на шинах 110 кВ ТП 3 лежат в диапазоне 50...57 %; аналогичный показатель для тока находится в интервале 26...27 %.

Расчеты ЭМП осуществлялись с учетом гармонических искажений, создаваемых выпрямительными электровазми. Результаты проиллюстрированы на рис. 9–11. На рис. 9 показаны графики $E_{max} = E_{max}(x)$ и $H_{max} = H_{max}(x)$, вычисленные на приемном конце ГИЛ 3, где x координаты оси, проходящей перпендикулярно трассе линии.

На рис. 10 приведены аналогичные графики для отношений напряженностей ВЛ и ГИЛ, из которых видно, что ГИЛ создает ЭМП со значительно меньшей интенсивностью. Из-за рез-

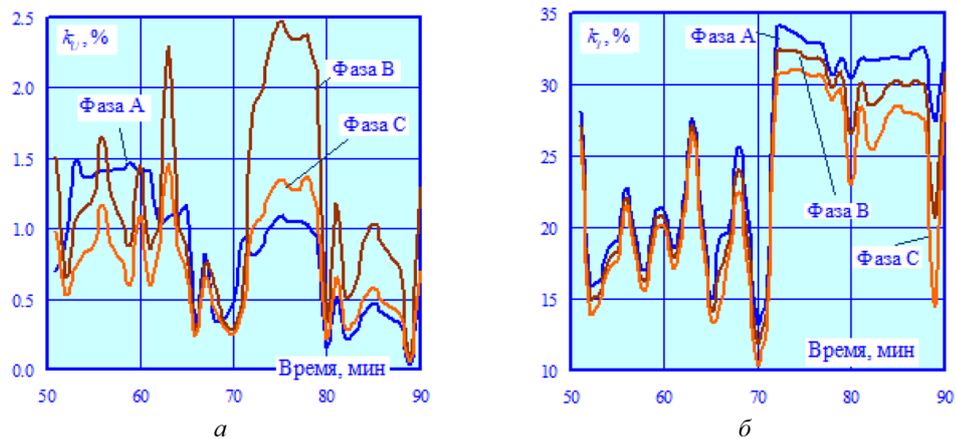


Рис. 8. Зависимости $k_U = k_U(t)$ (а) и $k_I = k_I(t)$ (б) на шинах 110 кВ ТП 3 в сети с ГИЛ

Fig. 8. Dependencies $k_U = k_U(t)$ (a) and $k_I = k_I(t)$ (b) on the 110 kV buses of TS 3 in the network with GIL

Таблица 2. Максимальные значения суммарных коэффициентов гармоник k_U на шинах 110 кВ ТП, %

Table 2. Maximum values of total harmonic distortion coefficients on 110 kV substation buses, %

Подстанция	ГИЛ			ВЛ			Различия между столбцами, %		
	А	В	С	А	В	С	2 и 5	3 и 6	4 и 7
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ТП 1	0,24	0,22	0,16	0,87	1,16	0,59	72	81	73
ТП 2	1,32	1,94	1,14	7,76	15,91	8,73	83	88	87
ТП 3	1,48	2,47	1,46	9,19	21,17	11,32	84	88	87

кого снижения уровней напряженности ГИЛ по мере удаления от оси линии величины γE , γH быстро возрастают и достигают при $x = 2$ значения 39 для E_{\max} и 6 для H_{\max} .

Так как коэффициенты гармоник токов существенно выше аналогичных параметров для напряжений, то влияние высших гармоник незначительно сказывается на напряженности электрического поля ГИЛ на высоте 1,8, но заметно увеличивает амплитуды H_{\max} (рис. 11, 12).

На рис. 13 показаны зависимости $E_{\max} = E_{\max}(t)$ и $H_{\max} = H_{\max}(t)$, вычисленные на приемном конце ГИЛ 3, из которых видно, что амплитуды магнитного поля варьируются более интенсивно, чем амплитуды электрического. Отвечающие этим графикам k_{VAR} соответственно равны 0,39 и 56 %, что хорошо коррелируется с показателями для токов и напряжений (см. рис. 6 и 7).

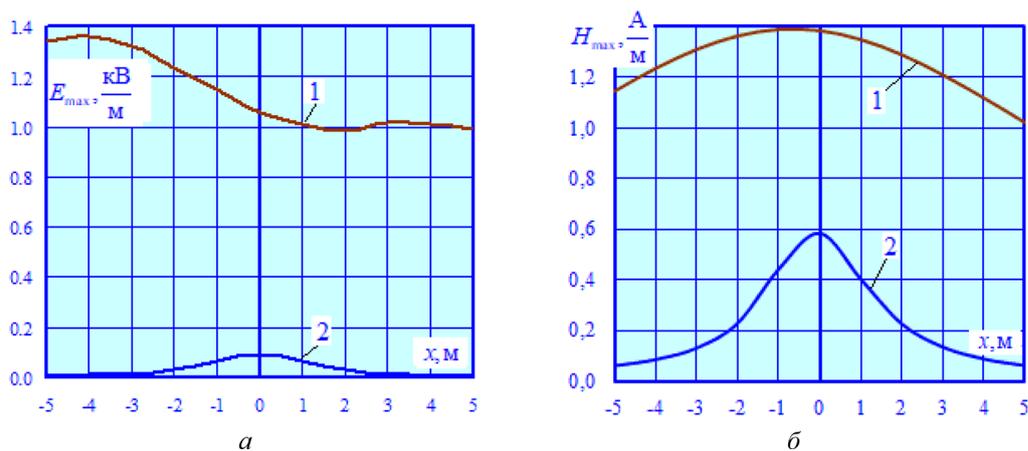


Рис. 9. Амплитуды напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей на высоте 1,8 м: 1 – ВЛ; 2 – ГИЛ

Fig. 9. Amplitudes of electric (a) and magnetic (b) field strengths: 1 – overhead power line; 2 – GIL

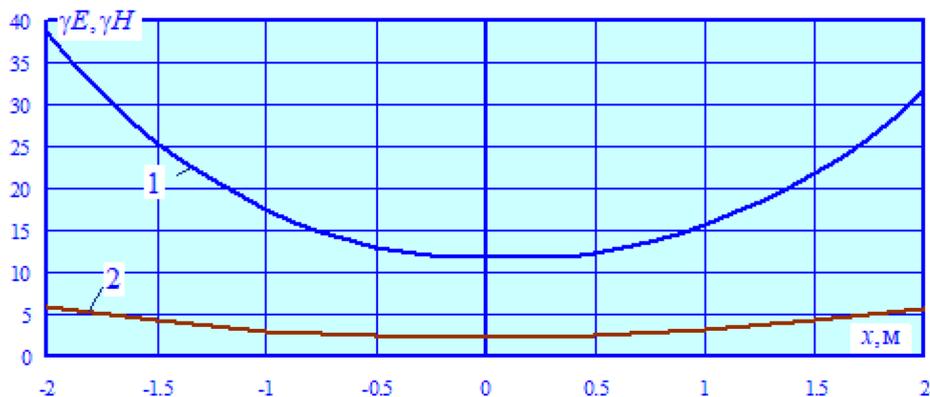


Рис. 10. Отношения амплитуд напряженностей ЭМП, создаваемых ВЛ и ГИЛ: 1 – $\gamma E = E_{\max}^{(OHL)} / E_{\max}^{(GIL)}$; 2 – $\gamma H = H_{\max}^{(OHL)} / H_{\max}^{(GIL)}$

Fig. 10. Ratios of EMF strength amplitudes generated by OHL and GIL: 1 – $\gamma E = E_{\max}^{(OHL)} / E_{\max}^{(GIL)}$; 2 – $\gamma H = H_{\max}^{(OHL)} / H_{\max}^{(GIL)}$

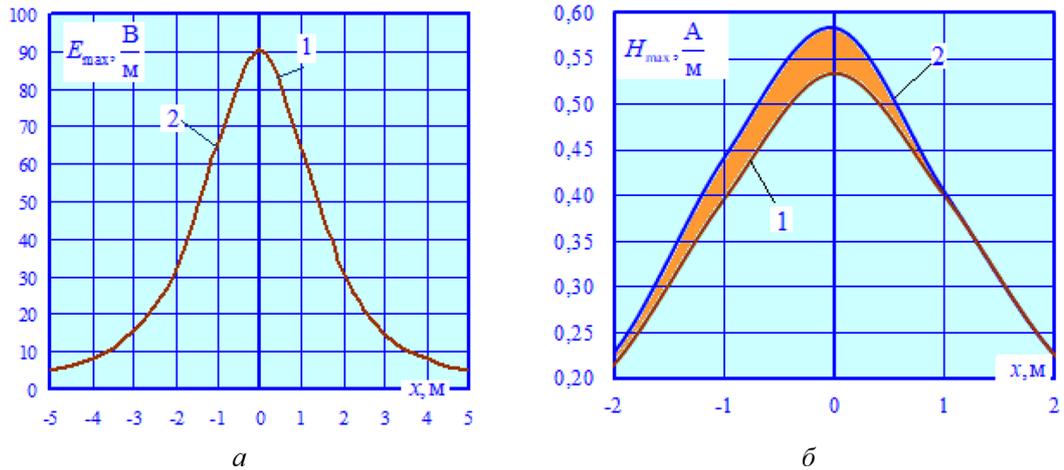


Рис. 11. Амплитуды напряженностей ЭП (а) и МП (б): 1–50 Гц; 2 – с учетом высших гармоник

Fig. 11. Amplitudes of electric (a) and magnetic (b) field strengths: 1–50 Hz; 2 – Including Higher Harmonics

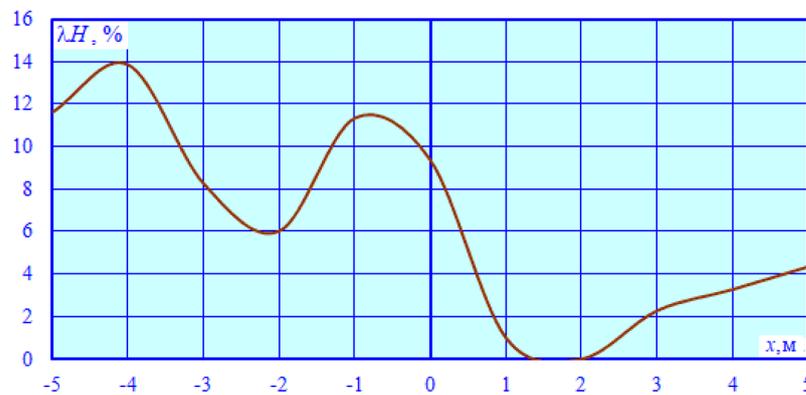


Рис. 12. Различия результатов расчета МП на основной частоте и с учетом ВГ: $\lambda H = \frac{H_{\max}^{(\text{harmonics})} - H_{\max}^{(50 \text{ Hz})}}{H_{\max}^{(50 \text{ Hz})}} \cdot 100$

Fig. 12. Differences in the results of magnetic field calculation at the fundamental frequency and taking into account higher harmonics: $\lambda H = \frac{H_{\max}^{(\text{harmonics})} - H_{\max}^{(50 \text{ Hz})}}{H_{\max}^{(50 \text{ Hz})}} \cdot 100$

На рис. 14 представлены годографы векторов напряженностей ЭМП, вычисленные на приемном конце ГИЛ 3 и отвечающие 76-й минуте моделирования. Из них видно, что малые значения k_U незначительно искажают форму кривой $E_y = E_y(E_x)$. Вследствие больших величин k_1 графики $H_y = H_y(H_x)$, построенные для основной частоты и с учетом высших гармоник (ВГ), заметно отличаются.

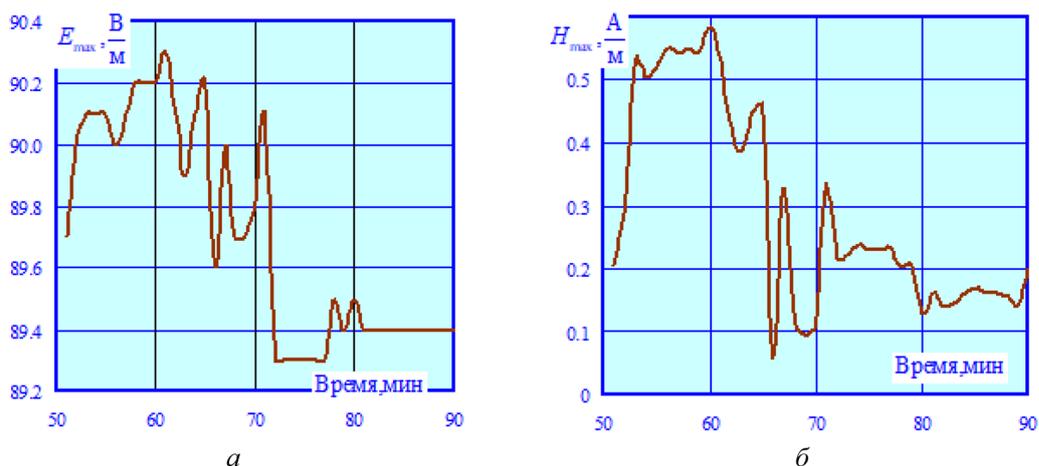
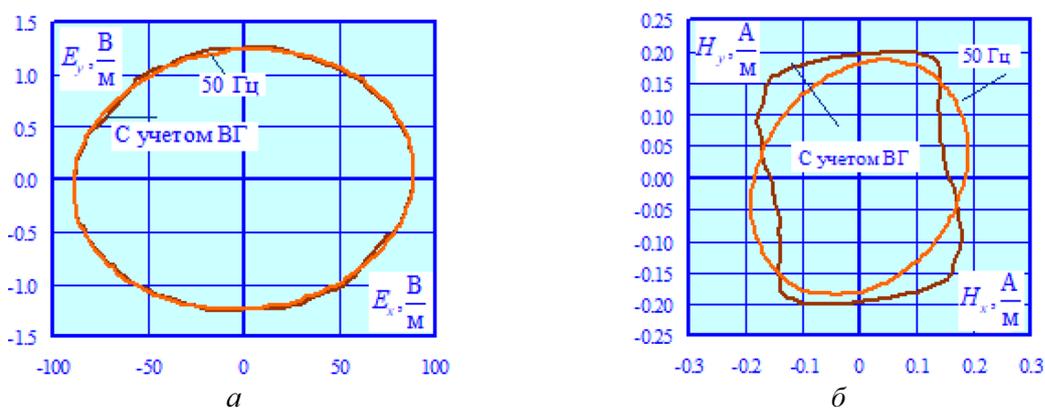
Рис. 13. Зависимости $E_{\max} = E_{\max}(t)$ (а) и $H_{\max} = H_{\max}(t)$ (б)Fig. 13. Dependencies $E_{\max} = E_{\max}(t)$ (a) and $H_{\max} = H_{\max}(t)$ (б)

Рис. 14. Годографы векторов напряженностей ЭМП

Fig. 14. Hodographs of electromagnetic field intensity vectors

Выводы

Разработаны цифровые модели, позволяющие определять режимы электрических сетей, реализованных на основе газоизолированных линий. Моделирование режимов железнодорожной системы электроснабжения показало, что на основе ГИЛ можно получить следующие положительные эффекты:

- уменьшение уровней несимметрии и гармонических искажений на вводах 110 кВ тяговых подстанций;
- уменьшение напряженностей ЭМП.

Использование ГИЛ позволяет значительно снизить коэффициенты несимметрии напряжений на шинах 110 кВ тяговых подстанций; при этом величины k_{2U} ГИЛ не выходят за нормативные пределы. Уровни гармонических искажений в сети ГИЛ в несколько раз ниже аналогичных показателей при использовании ВЛ. Проведенные расчеты ЭМП подтвердили, что

ГИЛ создает напряженности электрического и магнитного полей, на порядок меньшие по сравнению с ВЛ, что резко снижает негативное воздействие на окружающую среду, персонал, население и электронное оборудование.

Список литературы / References

- [1] Qiao Y.J., Liang R., Gao P., Zhu S. Y., Chen C. Y., Qin Y. X., Tang X. Z. Heat Transfer Analysis of Different Conditions for SF₆/N₂ Gas-Insulated Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2021. 36(2). 831–840.
- [2] Lauria D., Quaia S. Technical comparison between a gas-insulated line and a traditional three-bundled OHL for a 400 kV, 200 km connection. *2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*. 2015. 597–601.
- [3] Habiburrahman A., Arya L. D. Comparison of Transmission Losses and Voltage Regulation of Overhead and Gas Insulated Transmission Line. *2020 IEEE International Conference on Advances and Developments in Electrical and Electronics Engineering (ICADEE)*. 2020. 1–3.
- [4] Li N., Xie H., Zhang J., Lu Y., Chen Y., Wan H., Liu Z. Study on Measurement of Electromagnetic Environment Characteristics of UHV AC GIL Test Line. *2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. 2020. 1–4.
- [5] Rao M.M., Thomas M.J., Singh B.P. Shielding Effectiveness of the Gas-Insulated Bus Duct for Transient EM Fields Generated in a GIS During Switching Operations. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2008. 23(4). 1946–1953.
- [6] Abd-Allah M.A. Magnetic fields around gas-insulated transmission lines crossing. *2001 Power Engineering Society Summer Meeting*. 2001. 3. 1754–1759.
- [7] Niu H., Chen Z., Zhang H., Luo X., Zhuang X., Li X., Yang B. Multi-Physical Coupling Field Study of 500 kV GIL: Simulation, Characteristics, and Analysis. *IEEE Access*. 2020. 8.
- [8] Benato R., Di Mario C., Koch H. High-Capability Applications of Long Gas-Insulated Lines in Structures. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2007. 22(1). 619–626.
- [9] Benato R., Fellin L. Magnetic field computation for gas insulated lines installed in gallery. *39th International Universities Power Engineering Conference. UPEC 2004*. 2004. 6–10.
- [10] Benato R., Carlini E.M., Di Mario C., Fellin L., Knollseisen G., Laussegger M., Muhr M., Worle H., Woschitz R. Gas insulated transmission lines in railway galleries. Part II. *2005 IEEE Russia Power Tech*. 2005. 1–8.
- [11] Benato R., Carlini E.M., Di Mario C., Fellin L., Paolucci A., Turri R. Gas insulated transmission lines in railway galleries. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2005. 20(2). 704–709.
- [12] Magier T., Dehler A., Koch H. AC Compact High Power Gas-Insulated Transmission Lines. *2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*. 2018. 1–5.
- [13] Hillers T., Koch H. Gas insulated transmission lines for high power transmission over long distances. *Proceedings of EMPD '98. 1998 International Conference on Energy Management and Power Delivery*. 1998. 2. 613–618.
- [14] Magier T., Tenzer M., Koch H. Direct Current Gas-Insulated Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2018. 33(1). 440–446.
- [15] Nganpitak T., Rugthaicharoencheep N., Chancharoensook P., Pattanadech N. Dielectric Loss Factor Measurement in A Gas-Insulated Transmission Line by Using Very Low Frequency Test. *2020*

17th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). 2020. 844–847.

[16] Alvi M.J., Izhar T., Qaiser A.A., Afzaal M.U., Anjum A., Safdar A. Pliability Assay of Conventional Gas Insulated Transmission Line and Flexible Gas Insulated Transmission Line Regarding Horizontal Directional Drilling Based Underground Cable Laying for Metropolitan Areas. *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*. 2018. 1–5.

[17] Koch H., Goll F., Magier T., Juhre K. Technical aspects of gas insulated transmission lines and application of new insulating gases. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2018. 25(4). 1448–1453.

[18] Закарюкин В.П., Крюков А.В. *Сложнонесимметричные режимы электрических систем*. Иркутск: ИрГУПС, 2005. 273 с. [Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Slozhnonnesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem*. Irkutsk: IrGUPS, 2005. 273 p. (in Russian)].

[19] Закарюкин В. П., Крюков А.В. *Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат*. Москва: Директ-Медиа, 2023. 156 с. [Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Modelirovanie sistem tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka na osnove faznykh koordinat*. Moskva: Direkt-Media, 2023. 156 p. (in Russian)]

[20] Буякова Н.В., Закарюкин В.П., Крюков А.В., Середкин Д.А. *Моделирование электромагнитных полей, создаваемых тяговыми сетями и линиями электропередачи: монография / под общ. ред. А.В. Крюкова*. Ангарск: РИО АГТУ, 2024. 482 с. [Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Seredkin D.A. *Modelirovanie `elektromagnitnykh polej, sozdavaemykh tyagovymi setyami i liniyami `elektroperedachi: monografiya / pod obsch. red. A.V. Kryukova*. Angarsk: RIO AGTU, 2024. 482 p. (in Russian)]

[21] Буякова Н.В., Закарюкин В.П., Крюков А.В., Середкин Д.А. Учет гармонических искажений при моделировании электромагнитных полей, создаваемых линиями электропередачи, питающими тяговые подстанции железных дорог, *Электричество*, 2022, (5), 28–38. [Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Seredkin D.A. Uchet garmonicheskikh iskazheniy pri modelirovanii elektromagnitnykh polej, sozdaemykh liniyami elektroperedachi, pitayushchimi tyagovye podstantsii zheleznykh dorog, *Elektrichestvo*, 2022, (5), 28–38 (in Russian)]

[22] Buyakova N.V., Kryukov A.V., Seredkin D.A., Thao L.V. Computer models in problems of ensuring electromagnetic safety, *E 3S Web of Conferences*, 2020, 216(3), 01062.

EDN: CQSGLH

УДК 621.643.053

Analysis of Magistral Pipeline Defectoscopy Methods and Their Development Prospects

Maksim G. Merenkov*, **Yurii N. Bezborodov**,
Roman G. Shaidurov and **Aleksander N. Sokolnikov**
Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation

Received 13.10.2025, received in revised form 08.11.2025, accepted 15.01.2026

Abstract. The article provides an analytical review of modern methods of non-destructive testing (defectoscopy) of main pipelines and linear infrastructure facilities. It conducts a comparative analysis of traditional and promising diagnostic technologies, highlighting their advantages, limitations, and areas of application. The main focus of the study is on the innovative radar method of remote diagnostics. The article substantiates its potential for real-time monitoring of the condition of long sections of pipelines. The proposed approach will enable the efficient detection of through defects and corrosion zones. In conclusion, the article formulates conclusions about the prospects for the implementation of radar technology, as well as about the existing problems and directions for further research in the field of linear structure flaw detection.

Keywords: pipeline, flaw detector, in-pipe flaw detection, radar, defect.

Acknowledgements. The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation as part of the scientific project No. 25–29–20079, <https://rscf.ru/project/25–29–20079>, and the Krasnoyarsk Regional Science Foundation grant.

Citation: Merenkov M. G., Bezborodov Y. N., Shaidurov R. G., Sokolnikov A. N. Analysis of Magistral Pipeline Defectoscopy Methods and Their Development Prospects. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(1), 64–75. EDN: CQSGLH



Анализ методов дефектоскопии магистральных трубопроводов и перспективы их развития

**М. Г. Меренков, Ю. Н. Безбородов,
Р. Г. Шайдунов, А. Н. Сокольников**
*Сибирский федеральный университет
Красноярск, Российская Федерация*

Аннотация. В статье представлен аналитический обзор современных методов неразрушающего контроля (дефектоскопии) магистральных трубопроводов и объектов линейной инфраструктуры. Проведен сравнительный анализ традиционных и перспективных технологий диагностики с выделением их преимуществ, ограничений и областей применения. В качестве основного предмета исследования рассматривается инновационный радиолокационный метод дистанционной диагностики. Обосновывается его потенциал для оперативного мониторинга состояния протяженных участков трубопроводов. Предлагаемый подход позволит с высокой эффективностью выявлять сквозные дефекты и зоны коррозии. В заключении сформулированы выводы о перспективах внедрения радиолокационной технологии, а также о существующих проблемах и направлениях для дальнейших исследований в области дефектоскопии линейных сооружений.

Ключевые слова: трубопровод, дефектоскоп, внутритрубная дефектоскопия, радиолокация, дефект.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках выполнения научного проекта № 25–29–20079, <https://rscf.ru/project/25-29-20079>, гранта Красноярского краевого научного фонда.

Цитирование: Меренков М. Г. Анализ методов дефектоскопии магистральных трубопроводов и перспективы их развития / М. Г. Меренков, Ю. Н. Безбородов, Р. Г. Шайдунов, А. Н. Сокольников // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(1). С. 64–75. EDN: CQSGLH

Введение

Основным способом транспортировки нефтепродуктов в России являются магистральные трубопроводы. Общая протяженность магистральных трубопроводов России оценочно составляет 217 тыс. км, включающая в себя нефтепроводы, газопроводы и продуктопроводы. Трубопроводы имеют сложную конструкцию, на которую в процессе эксплуатации воздействуют внутренние и внешние силы. В связи с этим дефектоскопия играет немаловажную роль для безаварийной эксплуатации.

В процессе эксплуатации трубопроводов углеводородного сырья на трубы воздействует множество факторов, влияющих на их целостность. Существует множество причин, которые могут вывести из строя трубопровод: несовершенство при проведении проектировочных работ; заводской брак; брак при строительно-монтажных работах; эксплуатация трубопровода, не соответствующая техническим характеристикам; старение материалов трубопровода; незаконные врезки и внешние механические воздействия.

Анализ данных Ростехнадзора за 2022 год показал, что на объектах магистрального трубопроводного транспорта и подземного хранения газа произошло 7 аварий.

Таблица 1. Распределение аварий по видам аварий на ОПО в 2021–2022 годах

Table 1. Distribution of accidents by type of accident at hazardous facilities in 2021–2022

Виды аварий	Количество аварий		
	2021 г.	2022 г.	+/-
Повреждение при проведении работ в охранной зоне	-	-	-
Неисправность и износ оборудования	6	6	-
Ошибки персонала	-	1	+1
Чрезвычайная ситуация природного характера	-	-	-
Брак сварочно-монтажных работ	-	-	-
Всего:	6	7	+1

Расследования наиболее крупной аварии показали, что разгерметизация трубопровода произошла в области коррозионного повреждения. Экономический ущерб от аварии составил 205 млн 623 тыс. руб. Для минимизации рисков возникновения подобных аварий необходимо своевременное проведение исследований трубопроводов.

Дефектоскопия магистральных трубопроводов является важным аспектом производственного процесса транспортировки углеводородного сырья. Она позволяет оценить состояние трубы, определить отклонения, предотвращая поломки на начальной стадии.

Основная часть

Методы диагностики магистральных трубопроводов можно разделить на два типа: разрушающий и неразрушающий (рис. 1) [1].

Разрушающий контроль включает гидравлические испытания трубопровода под давлением и механические испытания отдельных металлических сегментов трубопровода.

Неразрушающий контроль основан на использовании физических методов для проверки качества без воздействия на структуру трубопровода и включает визуально-измерительный контроль (ВИК), контроль проникающими веществами (КПВ), магнитный контроль (МК), электромагнитный контроль (ЭМК), ультразвуковой контроль (УЗК), радиационный контроль (РК), тепловой контроль (ТК).

Визуально-измерительный контроль магистральных трубопроводов представляет собой неразрушающий метод диагностики, позволяющий выявлять поверхностные дефекты труб,



Рис. 1. Классификация методов диагностики магистральных трубопроводов и их объектов

Fig. 1. Classification of methods for diagnosing main pipelines and their facilities

сварных швов без нарушения целостности конструкции, проверять геометрические параметры трубопровода.

Визуально-измерительный контроль осуществляется как на отдельных объектах магистральных трубопроводов, так и при обследовании протяжённых участков магистральных трубопроводов.

При выполнении контроля осуществляется визуальный осмотр, в ходе которого выявляются дефекты и неоднородности, выходящие на поверхность трубы, после чего осуществляется измерение выявленных дефектов.

Ограничениями метода визуально-измерительного контроля являются:

1. Зависимость от человеческого фактора: велика вероятность пропуска микротрещин и дефектов в скрытых местах;
2. Выявление только поверхностных дефектов;
3. Необходим прямой доступ к трубопроводу.

Метод контроля проникающими веществами представляет собой неразрушающий метод контроля, основанный на явлении капиллярной активности. Данный метод предназначен для обнаружения поверхностных дефектов трубы.

Дефектоскопия выполняется следующим образом: сначала производится тщательная очистка поверхности, подлежащей исследованию. Затем на неё обильно наносят индикаторную жидкость. После того как жидкость высохнет, её удаляют, а поверхность просушивают. Для визуализации дефектов на поверхность наносят проявитель, в результате чего в местах повреждений формируются характерные цветовые изменения, соответствующие форме дефекта.

Данный метод дефектоскопии позволяет определять дефекты менее 1 мкм, при том что технология выполнения метода контроля позволяет получать результаты в полевых условиях на месте выполнения работ [2].

Ограничениями метода контроля проникающими веществами являются:

1. Опасность индикаторной жидкости, для выполнения работ необходимы специальные средства индивидуальной защиты;
2. Необходим прямой доступ к трубопроводу;
3. Возможно определение только поверхностных дефектов;
4. Требуется качественная подготовка исследуемой поверхности.

Метод контроля проникающими веществами проводится как на отдельных объектах магистральных трубопроводов, так и при обследовании протяжённых участков магистральных трубопроводов. Контроль осуществляется оператором-дефектоскопистом при помощи портативных приборов.

Магнитный контроль магистральных трубопроводов представляет собой неразрушающий метод контроля, основанный на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающего в местах выявления дефекта. Метод работает для исследования трубопроводов из ферромагнитных материалов [3].

В процессе исследования осуществляется намагничивание стенки трубопровода при помощи постоянных магнитов. Различают две технологии намагничивания трубопровода: продольное или поперечное. На участках трубопровода без дефектов магнитный поток сохраняет свою стабильность. Однако в местах, где имеются дефекты, нарушение целостности трубы

Таблица 2. Виды магнитного контроля магистральных трубопроводов и их объектов

Table 2. Types of magnetic control of main pipelines and their facilities

Критерии	Метод магнитной проницаемости	Магнитопорошковый метод
Принцип выполнения	Основан на регистрации рассеяния магнитного потока в стенке трубы, происходящего в зоне поверхностных и подповерхностных дефектов	Основан на притяжении частиц магнитного индикатора к поверхностным дефектам. Исследуемый интервал трубы намагничивают, затем покрывают магнитным порошком, порошок оседает в местах дефектов
Особенности	Позволяет обнаружить нарушения целостности металла трубы	Позволяет обнаружить нарушения сплошности трубы. Позволяет наглядно оценить результат

приводит к концентрации магнитного поля, которое выходит за пределы трубопровода и распространяется в окружающую среду.

Для обследования магистральных трубопроводов с применением магнитного контроля используются различные виды диагностики (табл. 2). Они отличаются по своему принципу действия. В зависимости от специфики применения могут использоваться разные подходы для выявления повреждений и нарушений целостности труб.

Эффективность магнитной диагностики магистральных трубопроводов может снижаться из-за неоднородной или недостаточной намагниченности исследуемых участков труб. Это напрямую влияет на качество определения дефектов. Для проведения диагностики применяются как внутритрубные, так и портативные диагностические устройства.

Электромагнитный контроль основан на использовании электромагнитных полей, которые взаимодействуют с поверхностью трубы, изменяя её магнитные характеристики в зависимости от целостности конструкции трубопровода.

В ходе исследования электромагнитное поле направляется на поверхность трубы. При наличии дефектов происходит изменение характеристик магнитного потока, которое фиксируется с помощью специализированных датчиков.

Вихретоковый метод дефектоскопии – один из эффективных способов электромагнитного контроля состояния магистральных трубопроводов.

Этот метод позволяет обнаруживать как поверхностные, так и подповерхностные дефекты в трубопроводах, изготовленных из токопроводящих материалов. С его помощью можно своевременно выявлять трещины, коррозию, зоны усталостного разрушения материала, а также оценить толщину изолирующего покрытия трубопровода.

Вихретоковый контроль состоит из нескольких этапов. Сначала производится подготовка объекта исследования, включающая очистку поверхности трубы от различных загрязнений. Затем начинается сам процесс контроля с использованием вихретокового преобразователя. Устройство оснащено одной или несколькими катушками, через которые пропускается синусоидальный или импульсный электрический ток. Под воздействием электромагнитного поля катушек в исследуемом проводящем материале возникают вихревые токи. При наличии дефектов происходит нарушение их нормального распространения. Это позволяет получить данные о характеристиках объекта и выявить возможные дефекты или неоднородности структуры.

Для проведения диагностики применяются портативные диагностические устройства.

Вихретоковый контроль магистральных трубопроводов имеет свои ограничения, обусловленные спецификой метода [4]:

- Современные вихретоковые дефектоскопы в основном могут обнаруживать дефекты на глубине не более 2 мм, что ограничивает глубину эффективного контроля.
- Метод неприменим для обследования участков с неоднородными электрическими характеристиками.
- Вихретоковый контроль неэффективен при выявлении дефектов, содержащих проводящие частицы.

Ультразвуковой контроль магистральных трубопроводов представляет собой неразрушающий метод диагностики, позволяющий выявлять внутренние и поверхностные дефекты трубы без нарушения целостности конструкции. Целью метода является оценка состояния трубы, сварных соединений и описание выявленных дефектов. Выявляемые дефекты трубопровода: трещины, коррозии, непровары, поры и др.

Технология ультразвукового контроля дефектов основывается на принципе отражения ультразвуковых волн от различных нарушений целостности стенок труб. Ключевым элементом системы является пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП), который выполняет функцию преобразования переменного электромагнитного поля в акустический сигнал. Этот сигнал, достигнув дефекта, отражается и возвращается к преобразователю, где снова превращается в электрический сигнал. Определение местоположения дефекта осуществляется по времени, которое затрачивается акустической волной на прохождение определённого расстояния. Размер дефекта оценивается по амплитуде отражённого импульса: более крупные дефекты создают более интенсивные отражённые сигналы. Таким образом, анализируя время распространения и амплитуду отражённого сигнала, можно точно определить как местоположение, так и размеры дефекта в стенке трубы.

При обследовании трубопроводов ультразвуковым методом применяются различные виды диагностики, среди которых: эхо-импульсный метод, теневой метод, метод с использованием волн Лэмба (табл. 3). Эти методы различаются как по принципу работы, так и по специфике выявляемых дефектов. Каждый из них имеет свои особенности и применяется в зависимости от характера и расположения повреждений в трубопроводе [5].

Среди ограничений ультразвуковой дефектоскопии можно выделить следующие:

1. Трудности при диагностике труб, изготовленных из неоднородных или крупнозернистых металлических сплавов;
2. Необходимость предварительной подготовки участка трубопровода перед проведением диагностики, включая очистку от загрязнений;
3. Помехи от внешних электромагнитных наводок, влияющие на качество получаемых сигналов;
4. Относительно высокая стоимость проведения диагностики.

Ультразвуковая дефектоскопия осуществляется с использованием двух типов оборудования: внутритрубных дефектоскопов и портативных устройств.

Радиационный контроль магистральных трубопроводов представляет собой неразрушающий метод контроля, основанный на регистрации и анализе ионизирующего излучения после взаимодействия с исследуемым участком.

Таблица 3. Виды ультразвуковых методов дефектоскопии магистральных трубопроводов

Table 3. Types of ultrasonic methods for defectoscopy of main pipelines

Критерии	Эхо-импульсный метод	Теневой метод	Метод с помощью волн Лэмба
Принцип выполнения	Основан на подаче акустического импульса и измерении эхо-сигнала	Основан на уменьшении амплитуды ультразвуковых колебаний, прошедших от источника к приемнику. Чем больше размер дефекта, тем меньше амплитуда прошедшего сигнала. Источник и приемник располагаются противоположно поверхности исследуемого материала	Источниками являются несколько ПЭП импульсов ультразвуковых волн Лэмба, их прием осуществляется также несколькими ПЭП. Замеры выполняются несколько раз на неповрежденном участке, далее замеры выполняются на поврежденном участке, и путем сравнения возмущенного волнового поля определяются участки повреждения
Особенности	Позволяет обнаружить поверхностные и глубинные дефекты с различной ориентированностью в стенке трубы; По времени и амплитуде поступившего эхо-сигнала определяются глубина залегания дефекта и его ориентировочный размер	Позволяет обнаруживать наклонные дефекты, не дающие прямого отражения при эхо-импульсном методе	Позволяет обнаруживать дефекты в металлах и композитных материалах

В процессе исследования рентгеновские лучи проникают через проверяемый участок металлической трубы и достигают детектора, роль которого выполняет рентгеновская плёнка. Если в трубе имеется дефект, на плёнке появится светлое пятно [6].

В зависимости от используемого источника ионизирующего излучения радиационный метод подразделяется на два вида – рентгенографический и гаммаграфический.

1. Рентгенографический метод использует рентгеновское излучение, которое генерируется с помощью рентгеновской трубки. Регистрация происходит с помощью детектора. Этот метод применяется для определения дефектов в стальных трубах толщиной до 80 мм.

2. Гаммаграфический метод использует гамма-излучение, которое образуется в результате внутриатомного распада радиоактивных веществ. В качестве источника гамма-излучения применяют тулий-170, иридий-192, цезий-137, кобальт-60. Этот метод применяется для определения дефектов в металлических трубах толщиной до 60 мм. Чувствительность гаммаграфического метода ниже чувствительности рентгенографического [7].

Радиационная дефектоскопия магистральных трубопроводов обладает техническими и нормативно-правовыми ограничениями. Технические ограничения метода зависят от используемого источника ионизирующего излучения и толщины исследуемого металла трубы. При работе с гамма-дефектоскопами необходимо учитывать срок службы источников излуче-

ния, так как интенсивность снижается со временем, и два одинаковых источника, заряженных в разное время, будут иметь разную активность.

На показания гамма-дефектоскопов влияет вещество, которое транспортируется по трубопроводу. Согласно стандартам, при энергии 0,015 МэВ линейный коэффициент ослабления воды составляет $1,64 \text{ см}^{-1}$, а воздуха – $2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$. Таким образом, вода ослабляет излучение примерно в 1000 раз сильнее, чем воздух. Учитывая плотность продукта, можно сделать вывод, что газ оказывает минимальное влияние из-за своей низкой плотности, в то время как нефть (нефтепродукты) плотнее газа и поэтому влияет сильнее.

Нормативно-правовые ограничения радиационного метода исследования связаны с обеспечением радиационной безопасности. Эти ограничения связаны с особенностями метода, влияющими на экологию, и вносят особые требования к дефектоскопистам, выполняющим исследования.

Радиационный метод дефектоскопии в классическом исполнении выполняется портативными дефектоскопами снаружи трубы, а также изнутри трубы, с применением кроулеров. Но есть и исключения, представленные в [8].

Тепловой контроль магистральных трубопроводов представляет собой неразрушающий метод, основанный на регистрации и анализе тепловых полей, возникающих из-за дефектов. Этот метод позволяет обнаруживать дефекты, оценивать качество изоляции трубопроводов и определять скрытые врезки.

Тепловой контроль проводится как с помощью портативных приборов, предназначенных для проверки отдельных участков трубопровода, так и посредством дистанционных тепловизоров, используемых для осмотра протяжённых участков (табл. 4) [9].

Дистанционная диагностика протяженных участков трубопровода включает облёт и съёмку участка трубопровода в видимом и инфракрасном спектрах на маловысотном летательном аппарате, таком как дирижабль, оснащённый тепловизионным комплексом высокого разрешения. Обработка тепловизионных изображений включает расчёт и создание трёхмерных моделей плотности теплового излучения зон прокладки трубопровода и блоково-разломных структур, а также построение горизонтальных, латеральных и вертикальных срезов и дифференциальных трансформаций этих моделей. Затем полученные данные интерпретируются, и на их основе составляются результирующие карты.

Поскольку данный метод измеряет тепловое излучение, главной ограничительной особенностью является его зависимость от времени года, времени суток и гидрометеорологических условий.

Таблица 4. Характеристики тепловизионной съёмки [9]

Table 4. Characteristics of thermal imaging [9]

Высота полета, м	50	100	300	500	1000
Масштаб съёмки	1:50	1:100	1:300	1:500	1:1000
Разрешение по глубине, м	0.03	0.06	0.18	0.3	0.6
Максимальная глубина проникновения, м	3	6	18	30	60

Анализируя методы дефектоскопии магистральных трубопроводов (табл. 5), можно сделать вывод о том, что каждый метод имеет свою область применения и ограничения, поэтому их следует рассматривать как взаимодополняющие.

Следует обратить внимание на ограниченное число дистанционных методов диагностики, которые позволяют оперативно проводить исследования на протяженных участках трубопровода, без вмешательства в процесс транспортировки сырья. Учитывая, что в нашей стране высоко развита трубопроводная транспортировка газа, нефти и нефтепродуктов, разработка нового дистанционного метода обследования магистральных трубопроводов является важной задачей для обеспечения безопасности транспортных систем.

Для решения этой задачи специалистами Сибирского федерального университета предлагается потенциально новый метод дистанционной диагностики магистральных трубопроводов, выполняемый с применением радиолокации [10]. Диагностика магистральных трубопроводов таким методом обеспечит быстрый контроль целостности стенок труб, качества сварных соединений и обнаружение несанкционированных врезок.

Радиолокационная диагностика осуществляется путем облучения трубопровода высокочастотным электромагнитным полем.

Физическая основа такого метода диагностики заключается в измерении амплитуды и фазы отражённого радиосигнала, определяемого параметром наведенного тока в скин-слое стенок трубы. Информативными параметрами являются дефекты стенок и сварных швов, состояние изоляции, несанкционированные врезки, местоположение и глубина залегания трубопровода [11].

Радиолокатор синхронизируется по несущей частоте генератором. При появлении на выходе полосового фильтра сигнала частоты вибраций дефекта трубы, время и координаты вибраций запоминается во флэш-памяти с помощью навигационного приемника Глонасс GPS.

Создавая неоднородность в стенке трубы в виде небольшого отверстия, можно вызвать вибрацию трубы из-за истечения жидкости или газа под высоким давлением около 80 атм. В этом случае частота вибрации может быть приблизительно оценена на основе давления, скорости истечения продукта и диаметра отверстия. В районе отверстия создается зона Френеля с длиной волны порядка $\lambda_a \approx 2D$.

Если представить дефект в виде отверстия в районе шва диаметром 10 мм, то частота вибрации, вызванной истечением струи продукта, определяется как

$$F = \frac{V_3}{2 \cdot D} = \frac{1500}{2 \cdot 10^{-2}} = 75 \text{ кГц}, \quad (1)$$

где V_3 – скорость звука в нефти.

При истечении газа эта частота снизится до 15 кГц.

Поскольку данная оценка является приблизительной, необходимо проведение прямого эксперимента для подтверждения частотных характеристик.

В отличие от внутритрубного способа дефектоскопии, предложенный дистанционный метод имеет высокую дальность и скорость обследования, при этом дистанционная радиолокационная диагностика позволяет отказаться от дополнительных трудозатрат, связанных с вмешательством в процесс перекачки углеводородного сырья.

Таблица 5. Анализ методов дефектоскопии магистральных трубопроводов

Table 5. Analysis of defectoscopy methods for main pipelines

Критерии	ВИК	КПВ	МК	ЭМК	УЗК	РК	ТК
Применение	Диагностика наружной поверхности трубопровода и его объектов	Диагностика наружной поверхности трубопровода и его объектов	Диагностика трубопровода и его объектов	Диагностика трубопровода и его объектов	Диагностика трубопровода и его объектов	Диагностика трубопровода и его объектов	Диагностика наружной поверхности трубопровода и его объектов
Основные ограничения	Зависимость от человеческого фактора; Выявление только поверхностных дефектов; Необходим прямой доступ к трубопроводу	Опасность индикаторной жидкости; Исследуются только поверхностные дефекты.	Ограничения, обусловленные слабой или неоднородной намагниченностью	Глубинность исследования не более 2 мм. Неприменим для обследования участков с неоднородными электрическими характеристиками. Неэффективен при выявлении дефектов, содержащих проводящие частицы	Помехи от внешних электромагнитных наводок, влияющие на качество получаемых сигналов; Трудности при диагностике труб, изготовленных из неоднородных или крупнозернистых металлических сплавов; Необходимость предварительной подготовки участка трубопровода перед проведением диагностики, включая очистку от загрязнений;	Зависимость от источника ионизирующего излучения; Влияет на экологию; Особые требования к дефектоскопистам	Зависимость от гидрометеорологических условий; Незначительная чувствительность
Тип оборудования	Портативный	Портативный	Внутритрубный; Портативный	Портативный	Внутритрубный; Портативный	Портативный; Внутритрубный	Дистанционный; Портативный
Скорость обследования	Зависит от работы оператора-дефектоскописта	Зависит от работы оператора-дефектоскописта	Высокая	Зависит от работы оператора-дефектоскописта	Высокая	Зависит от работы оператора-дефектоскописта	Высокая

Выводы

1. Современные методы диагностики магистральных трубопроводов являются уникальными и взаимодополняющими друг друга.
2. Учитывая общую протяженность магистральных трубопроводов России – 217 тыс. км, разработка нового дистанционного метода диагностики магистральных трубопроводов с применением радиолокации является важной задачей для обеспечения безопасности транспортных систем.
3. Дистанционная диагностика магистральных трубопроводов с применением радиолокации в сравнении с другими современными методами неразрушающего контроля обеспечит быстрый контроль целостности магистральных трасс с меньшими трудозатратами.

Список литературы / References

- [1] Манько П. О. Диагностика трубопроводов с применением внутритрубных дефектоскопов, *Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля*, 2021, № 9(51), 35–39 [Man'ko P. O. Diagnostics of pipelines using in-pipe flaw detectors, *Bulletin of Vladimir Dahl Luhansk State University*, 2021, No. 9 (51), 35–39 (in Russian)]
- [2] Все о капиллярном контроле сварных соединений [Электронный ресурс]. [All about capillary testing of welded joints: Electronic resource]. Access: <https://ont-lab.ru/blog/vse-o-kapillyarnom-kontrole-svarnykh-soedineniy>
- [3] Чибриков И. О., Тян В. К. Анализ методов внутритрубной диагностики магистральных нефтепроводов, *Просвещение и познание*, 2022, 8 (15), 3–11 [Chibrikov I. O., Tyan V. K. Analysis of methods of in-line diagnostics of main oil pipelines. *Education and Cognition*, 2022, 8 (15), 3–11 (in Russian)]
- [4] Вихретоковый контроль – электромагнитный метод дефектоскопии черных, цветных металлов и не только [Электронный ресурс]. [Eddy current testing is an electromagnetic method for flaw detection of ferrous, non-ferrous metals and more: Electronic resource]. Access: <https://defektoskopist.ru/osnovi-nk/vixretkovyj-kontrol.56/?ysclid=mfkmi80327854093330>
- [5] Ультразвуковой контроль эхо-методом основные параметры [Электронный ресурс]. [Ultrasonic testing by echo method: main parameters: Electronic resource]. Access: <https://defektoskopist.ru/osnovi-nk/ultrazvukovoj-kontrol.27/>
- [6] Радиографический контроль газопроводов и нефтепроводов [Электронный ресурс]. [Radiographic inspection of gas and oil pipelines: Electronic resource]. Access: <https://defektoskopist.ru/osnovi-nk/radiograficheskij-kontrol-svarnykh-soedinenij-truboprovodov.78/>
- [7] Физические методы контроля сварных швов [Электронный ресурс]. [Physical methods of testing welded joints: Electronic resource]. Access: <https://neftegaz.ru/science/Oborudovanie-uslugi-materialy/332080-fizicheskie-metody-kontrolya-svarnykh-shvov/>
- [8] Власов А. Н., Долгих В. И., Дроздов В. Д., Маслов Б. В. Способ внутритрубной дефектоскопии магистральных трубопроводов. Патент РФ № 2148808 от 10.05.2000 [Vlasov A. N., Dolgikh V. I., Drozdov V. D., Maslov B. V. Method of in-pipe flaw detection of main pipelines. RF Patent No. 2148808 dated 10/05/2000]
- [9] Каримов К. М., Соколов В. Н., Онегов В. Л., Кокутин С. Н., Каримова Л. К., Васев В. Ф. Способ дистанционной диагностики магистральных трубопроводов. Патент РФ

№ 2428722 от 10.09.2011 [Karimov K. M., Sokolov V. N., Onegov V. L., Kokutin S. N., Karimova L. K., Vasev V. F. *Method for remote diagnostics of main pipelines*. RF Patent No. 2428722 dated 10/09/2011]

[10] Шайдуров Г. Я., Меренков М. Г., Шайдуров Р. Г., Сокольников А. Н. *Система для дистанционного обнаружения дефектов и мест несанкционированной откачки в магистральных трубопроводах*. Патент РФ № 2821691 от 26.06.2024 [Shaidurov G. Ya., Merenkov M. G., Shaidurov R. G., Sokolnikov A. N. *System for remote detection of defects and unauthorized pumping sites in main pipelines*. RF Patent No. 2821691 dated 26/06/2024]

[11] Шайдуров Г. Я., Меренков М. Г., Шайдуров Р. Г., Майков О. А., Кохонькова Е. А. Физико-технические основы диагностики магистральных трубопроводов методом радиолокации. *Журнал. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*, 2024, 17(6), 802–813 [Shaidurov G. Ya., Merenkov M. G., Shaidurov R. G., Maikov O. A., Kokhonkova E. A. Physical and technical foundations of diagnostics of main pipelines by the radar method, *J. Sib. Feder. University. Engineering and Technology*, 2024, 17(6), 802–813 (in Russian)]

**Math Modeling.
Numerical Experiment**

**Математическое
моделирование.
Численный
эксперимент**



EDN: BICHXU

УДК 669.042:532.5

Numerical Simulation of the Basalt Melt Flow Through the Feeder Tray of Gas-Electric Furnace

**Maria A. Lukanina^{a*}, Vladimir A. Popov^a,
Alekcander V. Lapin^b and Vladimir I. Lazarev^b**

^aLLC Gipronickel Institute

Saint Petersburg, Russian Federation

^bAO “Kanex Technology” (Joint Stock Company)

Moscow, Russian Federation

Received 24.06.2025, received in revised form 08.11.2025, accepted 15.01.2026

Abstract. The quality of the mineral wool obtained from basalt melt depends on stable mass flow rate and slug properties. Basalt slag supplies from gas-electric furnace to centrifuge through the “feeder tray”, that uses to stabilize the slag flow, decrease flow rate fluctuations and maintain the required temperature. In this work we used CFD (Computational Fluid Dynamics) methods (within the ANSYS Fluent program) to estimate the feeder efficiency. The practice of numerical simulations of industrial processes shows that these methods allow evaluating the operation of equipment without making expensive and long experiments. We found that the base feeder design is efficient enough in decreasing of short period pulsation (about 1 sec), but this feeder fails to mitigate long period pulsations (more than 100 sec). The analysis of the melt velocity field showed that the maximum pulsation of velocity occurs in the upper part of the flow. The velocities in the lower part of the melt practically do not change when the melt flow rate changes. The simulation showed that an increase in the size of the feeder (its height) does not significantly affect the stabilization of the output flow with rapid fluctuations in the output flow characteristic of a gas-electric cupola (in the same amplitude range). A modification of the base design was proposed and numerically simulated. We suggested incorporating a baffle in the center of the feeder tray. The baffle increases the efficiency of pulsation damper both for short-period and long-period fluctuations. To reduce stagnant zones and heat loss, we propose to use inclined slag melt flow into the tray, i.e. use skew brick instead of usual.

Keywords: CFD, computational fluid dynamics, ANSYS Fluent, numerical simulation, melt, velocity field, mineral wool, cupola furnace.

Citation: Lukanina M. A., Popov V. A., Lapin A. V., Lazarev V. I. Numerical Simulation of the Basalt Melt Flow Through the Feeder Tray of Gas-Electric Furnace. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(1), 78–91.
EDN: BICHXU



© 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: lukanimama@nornik.ru

Компьютерное моделирование узла выдачи расплава базальта из газозлектрической вагранки

М. А. Луканина^а, В. А. Попов^а,
А. В. Лапин^б, В. И. Лазарев^б

^аООО «Институт Гипроникель»
Российская Федерация, Санкт-Петербург

^бАО «Канекс Технологии»
Российская Федерация, Москва

Аннотация. Качество получаемой из расплава базальта минеральной ваты зависит, в числе прочего, от постоянства расхода расплава, подаваемого из газозлектрической вагранки на центрифугу, а также от физических и химических свойств расплава. Задача желоба «фидера», входящего в состав узла выдачи расплава, – обеспечивать стабильность передачи расплава, гасить пульсации расхода, поддерживать необходимую температуру. В настоящей работе работоспособность конструкции фидера была оценена с помощью компьютерного моделирования методами вычислительной гидрогазодинамики в рамках программного пакета ANSYS Fluent. Практика компьютерного моделирования промышленных процессов показывает, что эти методы позволяют оценить работу оборудования, не прибегая к дорогостоящим и долгим экспериментам. Оказалось, что предлагаемая конструкция фидера сравнительно эффективно гасит короткие пульсации расхода (период около 1 с) и пропускает медленные изменения (период более 100 секунд). Анализ поля скоростей расплава показал, что основные изменения скорости движения расплава происходят в верхней части потока. Скорости в нижней часть расплава практически не меняются при изменении расхода расплава. Моделирование показало, что увеличение размеров фидера (его высоты) не оказывает существенного влияния на стабилизацию выходного потока при быстрых колебаниях выходного потока, характерных для газозлектрической вагранки (в том же диапазоне амплитуд). Модификация конструкции (установка перегородки в ванне желоба) позволяет повысить эффективность гашения как коротко- так и длиннопериодических колебаний. Для уменьшения застойных зон и снижения теплопотерь предлагается организовать наклонный сход расплава в ванну (использовать кирпич со срезом вместо прямоугольного).

Ключевые слова: CFD, вычислительная гидрогазодинамика, программа ANSYS Fluent, компьютерное моделирование, минеральная вата, вагранка, расплав, поле скорости.

Цитирование: Луканина М. А. Компьютерное моделирование узла выдачи расплава базальта из газозлектрической вагранки / М. А. Луканина, В. А. Попов, А. В. Лапин, В. И. Лазарев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(1). С. 78–91. EDN: BICHXU

Введение

Для получения минеральной ваты расплав базальта из газозлектрической вагранки (ГЭВ) подаётся на узел выдачи расплава, состоящий из выпускного шибера и желоба-фидера. Такой узел должен обеспечивать стабильную передачу расплава от вагранки на центрифугу, гасить пульсацию расплава, поддерживать необходимую температуру. Способность фидера решать эти задачи зависит от ряда его геометрических характеристик и эксплуатационных особенностей – геометрических размеров, уровня ванны, высоты порогов, интенсивности подогрева расплава. Подбор оптимальных характеристик фидера в настоящее время целесообразно выполнить методами компьютерной вычислительной гидрогазодинамики [1–5], достаточно достоверными для пирометаллургических процессов.

В настоящей работе методами вычислительной гидрогазодинамики была оценена работоспособность предлагаемой конструкции фидера и предложены варианты её оптимизации.

Постановка задачи

На рис. 1 показана 3D-модель внутреннего пространства фидера в базовой постановке. В ходе исследований предложен вариант конструкции с перегородкой по центру ванны расплава, показанный на рис. 2.

В табл. 1 представлены геометрические размеры исследуемой области фидера.



Рис. 1. 3D-модель фидера. Голубой цвет – входная граница для воздуха, красный – выходная граница для расплава

Fig. 1. 3D model of the feeder tray. Boundary conditions: cyan – air inlet, red – outlet



Рис. 2. 3D-модель фидера с перегородкой

Fig. 2. 3D model of the feeder tray with a baffle

Таблица 1. Размеры расчётной области фидера

Table 1. Dimensions of the feeder's calculation area

Параметр	Размер, мм
Общая длина	2800
Ширина ванны	450
Длина ванны	1300
Расстояние от пода ванны до свода	300
Расстояние от пода до перегородки	100

Для построенной геометрической модели с помощью программы Fluent Meshing программного пакета Ansys 2022 R1 сгенерирована расчётная сетка из многогранных ячеек с призматическими пограничными слоями вдоль твёрдых стенок. Общее количество ячеек – 550 000.

Во внутреннем объёме фидера присутствуют две среды – жидкий расплав и воздух. Входные условия для расплава – заданный массовый расход и температура. В зависимости от этапа моделирования расход расплава задавался следующим образом:

- постоянный расход 3 т/ч;
- разовое ступенчатое изменение расхода;
- синусоидальное изменение расхода с амплитудой 1–5 т/ч и периодом от 1 до 120 секунд.

Температура расплава на входе 1440 °С, температура воздуха 30 °С. Граничные условия на поток тепла для стенок, пода и свода фидера рассчитаны по данным о марках и толщине используемых материалов.

В качестве начального условия было принято, что ванна фидера заполнена расплавом до уровня 160 мм. В ходе расчёта равновесный уровень расплава несколько менялся в зависимости от заданной производительности.

Принятые для расчётов физические свойства расплава и газа показаны в табл. 2. Свойства расплава – плотность, теплопроводность, теплоёмкость и вязкость – заданы в виде зависимо-

Таблица 2. Физические свойства сред

Table 2. Physical properties of environments

Параметр, ед. изм.	Расплав	Газ
Плотность, кг/м ³	2900	1.225
Коэфф. теплопроводности, Вт/м·К	1–1.2	0.0242
Коэфф. теплоёмкости, Дж/м·К	1400	1006
Вязкость, Па/с	0.4–0.6	1.7894e-05
Коэфф. поверхностного натяжения, Н/м	0.1	

стей от температуры, полученных эмпирически. Показан диапазон величин, полученных при наблюдаемых в ванне фидера значениях температуры.

Методика проведения исследований

Основной метод исследования в настоящей работе – компьютерное математическое моделирование гидрогазодинамики. Для численного решения задачи использовался CFD-код FLUENT программного пакета Ansys 2022 R1.

В ходе постановки задачи о течении расплава было определено, что число Re как в расплаве, так и в газовой фазе намного ниже критического значения. Поэтому в математической модели фидера принят ламинарный режим течения.

Используемая для расчёта модель многофазности – VOF (volume of fluid).

Моделирование потока расплава с постоянным расходом 3 т/ч

Результаты расчёта показаны на рисунках ниже. В ходе расчёта определяется граница между расплавом и воздухом, т.е. поверхность расплава. На этой поверхности отображены поля скорости (рис. 3) и температуры (рис. 4). Поле температуры показано в рабочем диапазоне от 1420 до 1440 °С.

На рис. 5 показано поле скорости вблизи стока расплава, шкала от 0 до 0.4 м/с.

Также поля скорости и температуры показаны в продольных сечениях расплава (рис. 6–8). Видно, что при температуре расплава на входе 1440 °С минимальная температура в целом по объёму фидера не ниже 1415 °С. Наиболее обширная зона пониженных температур соответствует придонной области на начальном участке ванны и слева по ходу течения (т.е. в стороне от основного потока расплава через фидер). По мере движения расплава придонные области

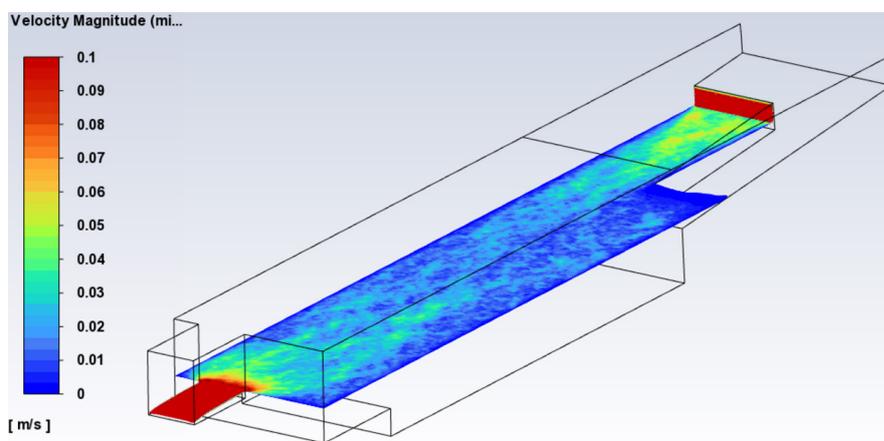


Рис. 3. Поле скорости на поверхности расплава при расходе 3 т/ч

Fig. 3. Velocity field at the melt surface, mass flow rate is 3 tons per hour

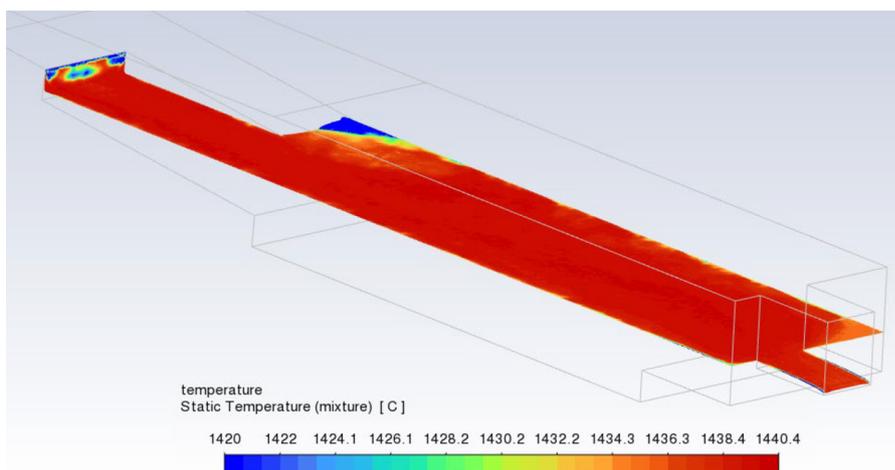


Рис. 4. Поле температуры на поверхности расплава

Fig. 4. Temperature field at the melt surface

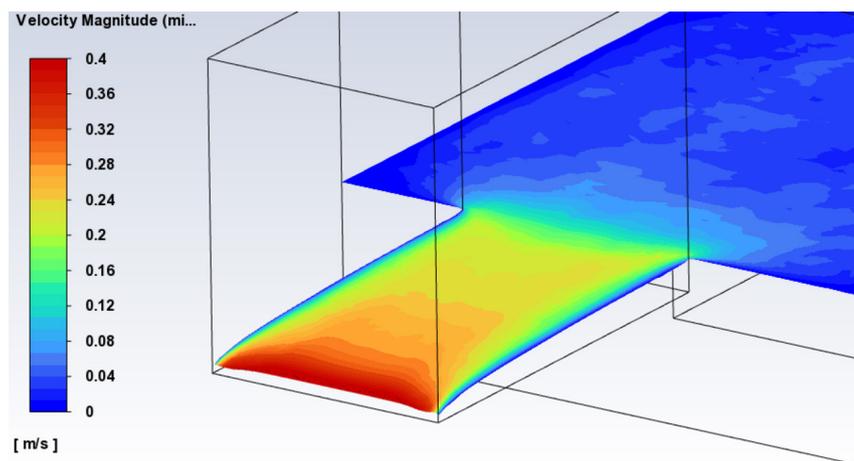


Рис. 5. Поле скорости вблизи стока расплава

Fig. 5. Velocity field near the outlet

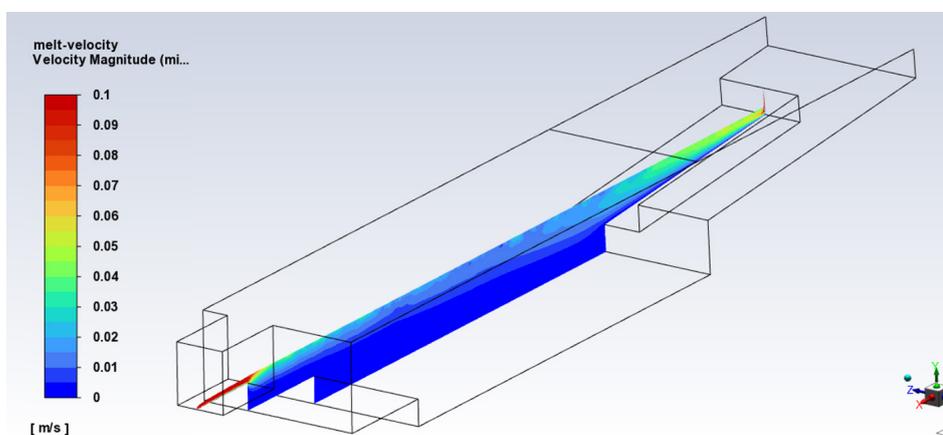


Рис. 6. Поле скорости в продольном сечении расплава

Fig. 6. Velocity field in the longitudinal section

прогреваются за счёт теплопередачи и перемешивания. На выходном участке наблюдаются зоны заметно пониженных температур в углах лотка. При продолжении исследований целесообразно рассмотреть тот или иной способ подогрева расплава.

Использование в торцах ванны кирпича со срезом, предположительно, позволит уменьшить застойную зону расплава и снижение его температуры на этих участках.

Моделирование пульсаций расхода при подаче расплава

Для анализа эффективности фидера с точки зрения стабилизации потока расплава, поступающего на центрифугу, оценим степень подавления фидером колебаний расхода с тем или иным периодом.

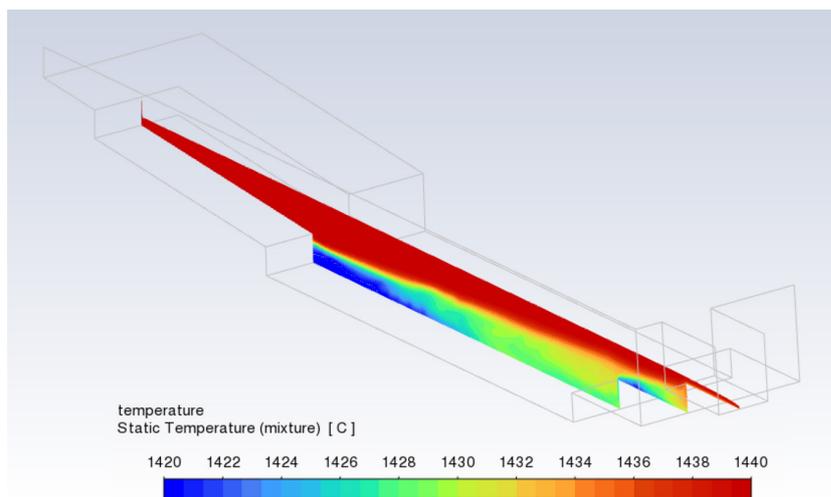


Рис. 7. Поле температуры в продольном сечении расплава

Fig. 7. Temperature field in the longitudinal section

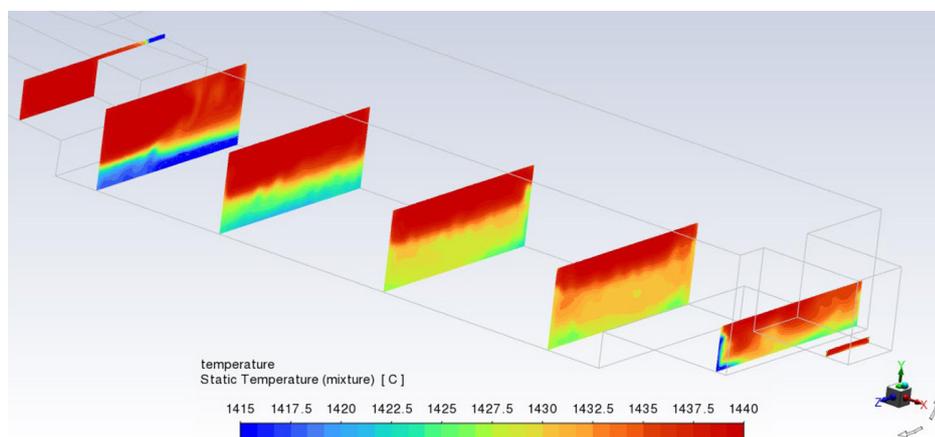


Рис. 8. Поле температуры в поперечных сечениях

Fig. 8. Temperature field in several cross sections

Для того чтобы понять, как быстро реагирует поток расплава на выходе на изменение расхода на входе, были проделаны расчёты со скачкообразным изменением расхода с 1 т/ч на 5 т/ч и обратно («прямоугольный импульс»). Это позволило оценить «частоту среза» фидера – более медленные изменения, вероятно, будут практически полностью пропускаться, а быстрые – с той или иной эффективностью ослабляться. Ниже приведены результаты этих предварительных расчётов.

На графике (рис. 9а) видно, что после одномоментного увеличения расхода расплава на входе с 1 до 5 т/ч расход расплава *на выходе* начинает увеличиваться приблизительно через 3 секунды. Для стабилизации расхода на выходе требуется больше 100 секунд. При резком

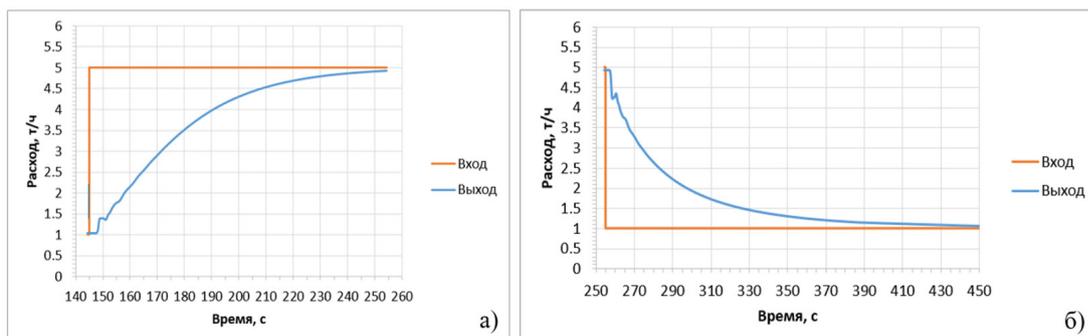


Рис. 9. Изменение расхода на входе и выходе: а) при резком увеличении расхода расплава с 1 до 5 т/ч, б) при резком падении расхода расплава с 5 до 1 т/ч

Fig. 9. Mass flow rate variations at the inlet and the outlet a) sharp increase from 1 to 5 tons/h, b) sharp reduction from 5 to 1 tons/h

падении входного расхода (рис. 9б) с 5 до 1 т/ч требуется 2.5 секунды, чтобы расход на выходе начал снижаться, и 200 с для выравнивания расхода на выходе.

Поля скорости для двух значений постоянного входного расхода 1 и 5 т/ч показаны на рис. 10. С увеличением расхода значения скорости растут, но общий характер их распределения в фидере сохраняется.

На поверхности расплава наибольшая скорость соответствует входному и выходному участкам, в основной части ванны скорость низкая, с небольшими завихрениями. На рис. 10

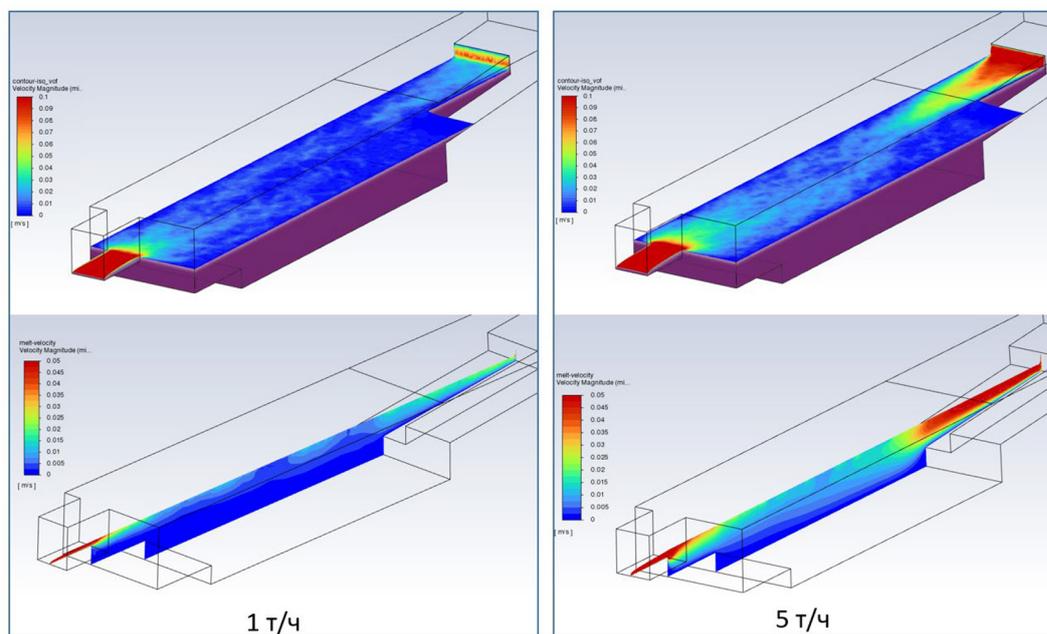


Рис. 10. Поле скорости на поверхности расплава и в продольном сечении фидера для двух значений расхода

Fig. 10. Velocity fields at the melt surface and in the longitudinal section for two mass flow values

показано поле скорости внутри расплава в продольном сечении, проходящем через середину выходного канала. Можно видеть, что по центру ванны в большей части объёма скорости течения меньше 5 мм/с.

Исходя из изложенного, можно предположить, что колебания с периодом выше 100–200 секунд должны практически полностью пропускаться фидером, более быстрые изменения – с той или иной эффективностью отфильтровываться.

Для определения эффективности погашения фидером пульсаций с разной частотой дальнейшие исследования проведены с синусоидальной зависимостью расхода на входе от времени, с амплитудой от 1 до 5 т/ч и периодами 1, 9 и 120 секунд (т.е. ниже и выше ожидаемой частоты среза фидера):

$$Q = \frac{5-1}{2} \cdot \sin \frac{2\pi \cdot t}{T} + \frac{5+1}{2} = 2 \cdot \sin \frac{2\pi \cdot t}{T} + 3,$$

где T – период.

Графики изменения расхода от времени показаны на рис. 11.

На рис. 12 показано поле скорости вдоль стенки ванны фидера (правой по ходу расплава). Видно, что течение с большей скоростью имеет место в верхней части ванны. Общий характер распределения скоростей в ванне при синусоидальных пульсациях близок к таковому при максимальной амплитуде.

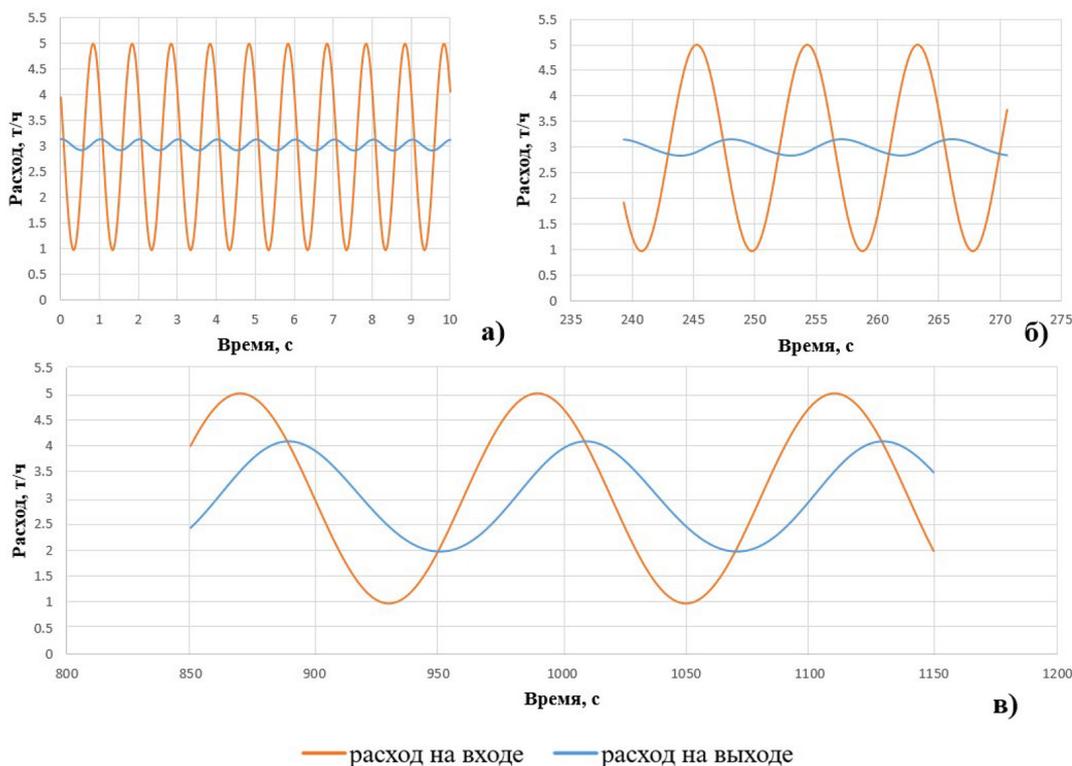


Рис. 11. Изменение расхода на входе и выходе с периодом пульсаций: а) 1 с, б) 9 с, в) 120 с

Fig. 11. Mass flow rate variations at the inlet and the outlet for different pulsations

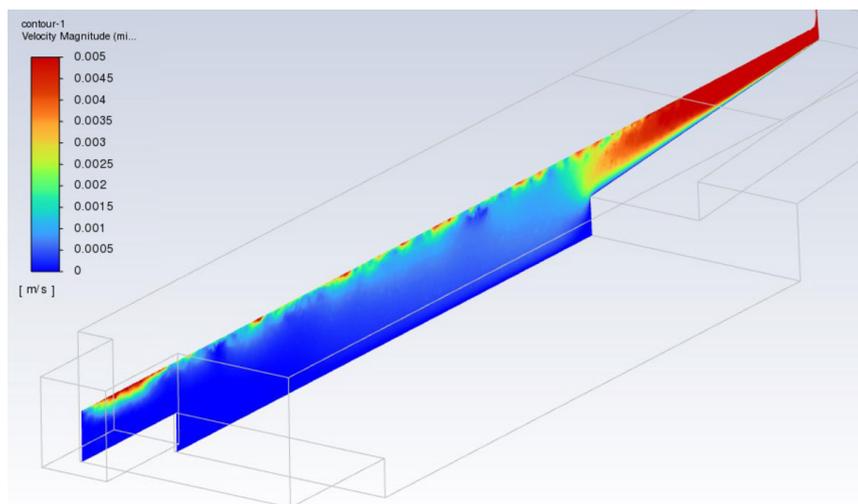


Рис. 12. Поле скорости вдоль стенки ванны фидера (период 9 с)

Fig. 12. Velocity field near the feeder wall

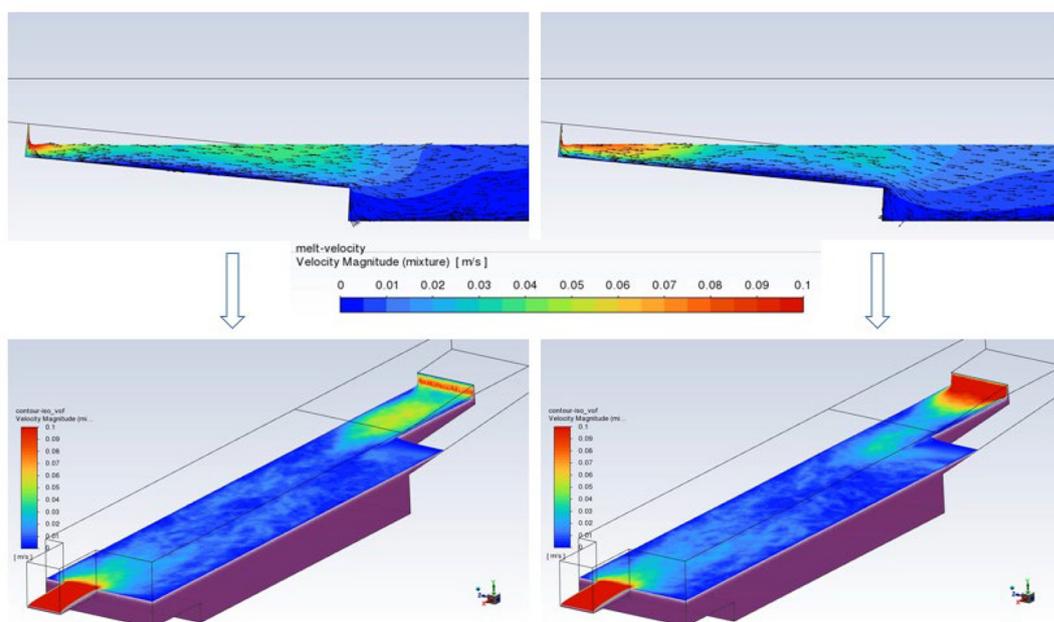


Рис. 13. Поле скоростей в продольном сечении (у входа) и на поверхности расплава (период 1 секунда)

Fig. 13. Velocity fields in the longitudinal section and at the melt surface for two moments (period 1 s)

На рис. 13 показаны два последовательных момента времени пульсации при периоде колебаний 1 секунда. Слева (вверху – продольное сечение, внизу – поверхность расплава) видны две последовательные волны расплава – передняя переходит из лотка в основную часть ванны, теряет скорость, распространяется на большую массу расплава, вторая – только сформировалась у входа, видно небольшой «вал» на поверхности. Справа показан следующий момент

течения. Видно, что в момент выхода волны в основной объём фидера имеет место некоторое крупномасштабное завихрение в левую по ходу потока область, течение же у выхода заметно более стабильно.

Поле скоростей на выходе фидера в значительной степени усредняется, колебания от волны к волне здесь менее выражены (рис. 14). Имеет место сравнительно постоянная область высоких скоростей в выходном канале и завихрение в торце основной части ванны.

Коэффициент передачи фидера в зависимости от периода пульсаций показан в табл. 3.

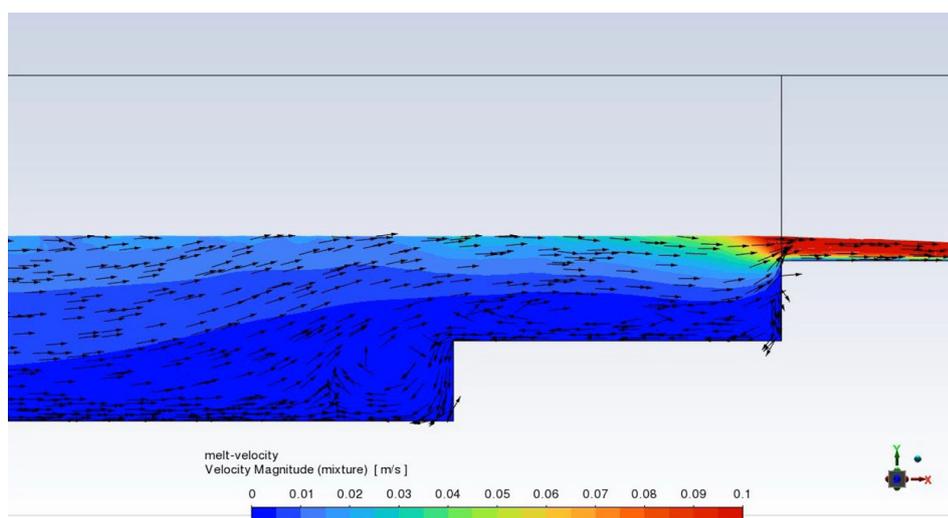


Рис. 14. Поле скоростей у выхода фидера (период 1 секунда)

Fig. 14. Velocity field neat the outlet for the period 1s

Таблица 3. Коэффициент передачи фидера в зависимости от периода пульсаций

Table 3. Feeder transmission coefficient depending on the pulsation period

Период	Входная амплитуда, т/ч	Выходная амплитуда, т/ч	Коэффициент передачи
1 с	4	0.220	0.055
9 с	4	0.322	0.0805
120 с	4	2.12	0.53

Видно, что фидер эффективно сглаживает быстрые пульсации потока расплава на входе – для периодов 1 и 9 секунд передаётся на выход только 5.5 и 8.05 % от исходной амплитуды. Для периода 120 секунд эффективность сглаживания значительно ниже – 53 % от амплитуды пульсаций сохраняется на выходе. Отметим, что для условий эксплуатации фильтра более характерны именно высокочастотные пульсации с периодом 1 секунда и ниже («всплески» расплава).

Моделирование пульсаций для фидера с перегородкой

Одним из весьма эффективных способов стабилизации потока на выходе фидера может являться установка погруженной в расплав перегородки из огнеупорного материала в основной части ванны. Рассчитано поведение расплава при установке такой перегородки по центру ванны, во всю её ширину.

Установлено, что при скачкообразном изменении расхода от 1 до 5 тонн и обратно поведение фидера практически то же, что для варианта без перегородки – время реакции почти не меняется. Частота среза такой конструкции будет близка к варианту без перегородки.

Картина течения в фидере при наличии перегородки показана на рисунках ниже.

На рис. 15 показано поле скоростей в продольном сечении и на поверхности расплава при пульсации расхода с периодом 1 с. Видны 3 последовательные волны высоких скоростей: у входа расплава (наибольшие скорости на неглубоком участке лотка); у выхода лотка (волна распространяется по объёму и теряет скорость); под перегородкой (скорость в узком месте несколько возрастает).

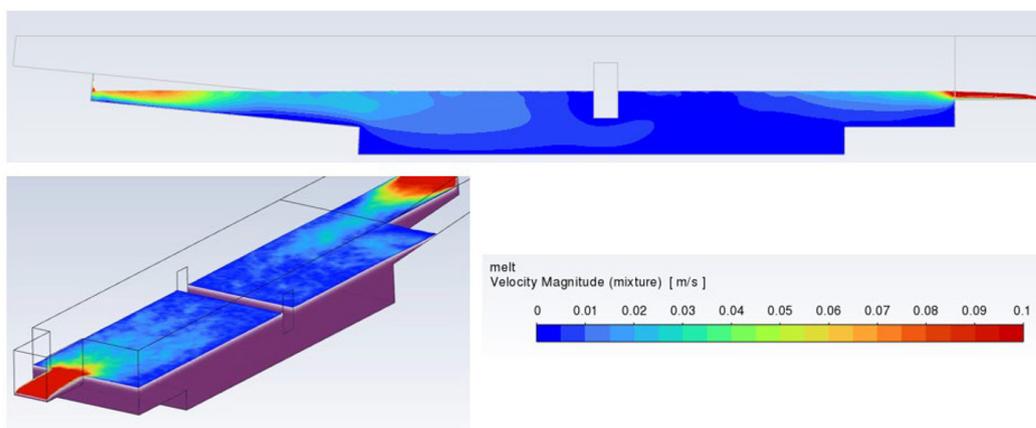


Рис. 15. Поле скоростей в продольном сечении и на поверхности расплава при пульсации расхода с периодом 1 с, вариант с перегородкой

Fig. 15. Velocity fields in the longitudinal section and at the melt surface with a baffle (period 1 s)

У выхода фидера картина скоростей сходна с таковой для варианта без перегородки. Колебания скорости сглажены, постоянная высокоскоростная область соответствует выходному участку, у порога ванны имеет место некоторое завихрение. На поверхности расплава видно то же завихрение влево по потоку.

Коэффициент передачи для колебаний разной частоты показан в табл. 4.

Видно, что перегородка оказывает заметное влияние на коэффициент пропускания колебаний с периодом ниже 1 секунды. В то же время коэффициент пропускания для колебаний с несколько меньшей частотой (период 9 секунд) фильтруются даже несколько менее эффективно.

Таблица 4. Коэффициент передачи фидера с перегородкой

Table 4. Feeder transmission coefficient with a partition

Период	Входная амплитуда, т/ч	Выходная амплитуда, т/ч	Коэффициент передачи
1 с	4	0.16	0.0398
9 с	4	0.33	0.0825

Заключение

При работе барботажных пирометаллургических агрегатов основной тип пульсации – высокочастотные пульсации с периодом колебаний порядка одной секунды. Исходя из результатов расчётов, предложенная конструкция фидера сравнительно эффективно фильтрует быстрые пульсации расплава (период ниже 1 секунды) и с низкой эффективностью – медленные изменения расхода с периодом 100 секунд и выше.

Анализ движения расплава (поля скоростей) показывает, что основные изменения скорости движения расплава происходят в верхней части потока. Скорости в нижней части расплава практически не меняются при изменении расхода расплава. Увеличение размеров фидера (его высоты) не окажет существенного влияния на стабилизацию выходного потока при быстрых колебаниях выходного потока, характерных для ГЭВ (в том же диапазоне амплитуд).

Установка перегородки позволяет дополнительно сгладить как высокочастотные, так и низкочастотные пульсации. Колебания расхода на выходе из фидера при установке перегородки составляют не более 0.33 т/час при начальных колебаниях расхода от 1 до 5 т/час. Столь высокие начальные колебания расхода носят экстремальный характер, при устойчивой работе печи колебания будут существенно меньше. Таким образом, установка фидера и перегородки позволит исключить колебания расхода на входе в центрифугу.

При начальной температуре 1440 °С наименьшая температура в основной части ванны – около 1415 °С, обширные низкотемпературные области соответствуют придонной зоне у входного лотка. Для уменьшения застойной зоны и компенсации охлаждения ванны целесообразно заменить прямоугольную кладку наклонным сходом расплава в основную часть ванны – т.е. на торцевых углах использовать кирпич со срезом.

По результатам компьютерного моделирования предлагаемая конструкция фидера позволяет решить поставленную задачу – стабилизацию подачи струи расплава на центрифугу.

Список литературы / References

- [1] Ferziger J. H., Peric M., Street R. L. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer, 2019.
- [2] *Ansys Fluent Theory Guide*. ANSYS, Inc., 2022.
- [3] Song K., Jokilaakso A. CFD modeling of the multiphase flow in an SKS furnace – the effect of melt density and viscosity. *Chemical Engineering Journal Advances*. Elsevier, 2023.
- [4] Daurer, Raič J., Demuth M., Gaber C., Hochenauer C. Detailed comparison of physical fining methods in an industrial glass melting furnace using coupled CFD simulations. *Applied Thermal Engineering*. Elsevier, 2023.

[5] Saad S.B., Gentric C., Fourmigué J.-F., Clement P., Leclerc J.-P. CFD and experimental investigation of the gas–liquid flow in the distributor of a compact heat exchanger. *Chemical Engineering Research and Design*, 2014.

[6] Загускин В.Л. *Основы численных методов для газодинамики с теплопроводностью*. М., 2022. 167 с. [Zaguskin V.L. *Fundamentals of Numerical Methods for Gas Dynamics with Thermal Conductivity*. Moscow, 2022. 167 p. (in Russian)]

[7] Федорова Н. Н., Вальгер С. А., Данилов М. Н., Захарова Ю. В. *Основы работы в ANSYS 17*. М.: ДМК пресс, 2016. 226 с. [Fedorova, N. N., Valger, S. A., Danilov, M. N., and Zakharova, Yu. V. *Fundamentals of Working with ANSYS 17*. Moscow: DMK Press, 2016. 226 p. (in Russian)]

[8] Янышев Д. С., Быков Л. В. *Сеточные модели для решения инженерных теплофизических задач в среде ANSYS*. М.: URSS, 2021. 264 с. [Yanyshv, D. S., and Bykov, L. V. *Grid-based Models for Solving Engineering Thermophysical Problems in the ANSYS Environment*. Moscow: URSS, 2021. 264 p. (in Russian)]

[9] Тахерифард А., Елистратов В. В. Численное моделирование гидродинамики многофазного потока методами CFD-анализа в трубопроводе с двойным коленом. *Вестник МГСУ. Гидравлика. Геотехника. Гидротехническое строительство*, 2023 [Takherifard, A., Elistratov, V. V. Numerical Modeling of Multiphase Flow Hydrodynamics Using CFD Analysis in a Double-Bend Pipeline. *Vestnik MGSU. Hydraulics. Geotechnics. Hydraulic Engineering*, 2023 (in Russian)]

[10] Талалов В. А., Крупнов Л. В., Румянцев Д. В. и др. Исследование движения газового потока в печи взвешенной плавки Надеждинского металлургического завода методами математического моделирования. *Цветные металлы*, 2015, 5, 86–91 [Talalov V. A., Krupnov L. V., Rumyantsev D. V. et al. Investigation of the Gas Flow Motion in the Slag Furnace of the Nadezhdinsky Metallurgical Plant by Mathematical Modeling Methods. *Tsvetnye Metally*, 2015, 5, 86–91 (in Russian)]

[11] Крупнов Л. В., Пахомов Р. А., Старых Р. В. и др. Изменение динамики газопылевого потока в ПВП НМЗ при установке защитного козырька. Модельные расчеты. *Цветные металлы*, 2021, 10, 63–71 [Krupnov L. V., Pakhomov R. A., Starykh R. V. et al. Changes in the dynamics of the gas-dust flow in the NMZ PVP when a protective visor is installed. Model calculations. *Tsvetnye Metally*, 2021, 10, 63–71 (in Russian)]

[12] Виницкий А. Л., Карпман В. Б., Лазарев В. И. *Газоэлектрическая вагранка (ГЭВ) для плавки неметаллических материалов*. Патент RU 2652044 С 1, 2018 [Vinitsky A. L., Karpman V. B., Lazarev V. I. *Gas-electric cupola (GEC) for melting non-metallic materials*. Patent RU 2652044 С 1, 2018].

[13] Крупнов Л. В., Румянцев Д. В., Попов В. А. и др. Технические решения по улучшению условий эксплуатации печей Ванюкова при переработке техногенного сырья. *Металлург*, 2024, 4, 106–111 [Krupnov L. V., Rumyantsev D. V., Popov V. A. et al. Technical solutions to improve the operating conditions of Vanyukov furnaces for processing man-made raw materials. *Metallurg*, 2024, 4, 106–111 (in Russian)]

[14] Крупнов Л. В., Румянцев Д. В., Цемехман Л. Ш. и др. Исследование условий возникновения промежуточного слоя в печах Ванюкова. *Современные технологии производства цветных металлов*. Сб. докл. Междунар. конф. памяти С. С. Набойченко. Екатеринбург, 27 октября 2023 г. С. 52–61 [Krupnov L. V., Rumyantsev D. V., Tsemekhman L. Sh. et al. Study of the conditions for the formation of an intermediate layer in Vanyukov furnaces. *Modern Technologies for the Production of Non-Ferrous Metals*. Int. Conf. Yekaterinburg, October 27, 2023. 52–61 (in Russian)]

EDN: APHBFS

УДК 544.6

Algorithm for Calculating the Optimization of the Parameters for the Electroextraction of Metal Based on the Example of Zinc

Nail F. Kashapov^a,

Lenar N. Kashapov^{b, c} and Violettta Yu. Chebakova^{b, c*}

*^aFederal Research Center «Kazan Scientific Center
of Russian Academy of Sciences»*

Kazan, Russian Federation, Republic of Tatarstan

*^bInstitute of Advanced Research of the Academy of Sciences
of the Republic of Tatarstan*

Kazan, Russian Federation, Republic of Tatarstan

^cKazan Federal University

Kazan, Russian Federation, Republic of Tatarstan

Received 06.09.2025, received in revised form 28.10.2025, accepted 15.01.2026

Abstract. A numerical algorithm combining the fourth-order Runge–Kutta scheme with the Hooke–Jeeves direct-search optimiser is proposed to solve an inverse kinetic problem that arises during zinc powder electrodeposition from alkaline electrolytes. The model describes two competing cathodic chains – zinc reduction and parasitic hydrogen evolution – through a coupled Cauchy system with positivity constraints. Unknown rate constants are estimated by minimising the squared deviation between calculated and experimental zinc yields, which reduces the amount of laboratory testing required. An applied result of the calculations also provides the ability to predict the yield of the deposited metal powder. Verification against published data at current densities of 125–500 A/m² shows relative errors below 5 % after 60 min of electrolysis and confirms that nucleation effects dominate only at the earliest stages. The approach therefore offers an efficient tool for parametrising and optimising electroextraction processes for zinc and other metals. At the same time, the velocity constants that are found can be used for calculations based on larger-dimensional models when calculating the spatial characteristics of an electrical system.

Keywords: Electroextraction optimisation; Hooke–Jeeves method; Inverse reaction kinetics; Zinc powder deposition; Runge–Kutta simulation.

Acknowledgements. The research was supported by RSF (project No. 25–21–00453).

© 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: vchebakova@mail.ru



Алгоритм оптимизации параметров для электроэкстракции металла на примере цинка

Н. Ф. Кашапов^а, Л. Н. Кашапов^{б, в}, В. Ю. Чебакова^{б, в}

^аФИЦ «Казанский научный центр РАН»

Российская Федерация, Татарстан, Казань

^бИнститут прикладных исследований Академии наук

Республики Татарстан

Российская Федерация, Татарстан, Казань

^вКазанский федеральный университет

Российская Федерация, Татарстан, Казань

Аннотация. Для решения обратной кинетической задачи, возникающей при электроосаждении цинкового порошка из щелочных электролитов, предлагается численный алгоритм, сочетающий схему Рунге-Кутты четвертого порядка с методом численной оптимизации, а именно методом прямого поиска Хука–Дживса. Модель описывает две конкурирующие катодные цепи – восстановление цинка и параллельное выделение водорода – с помощью системы, состоящей из задач Коши с наложенными ограничениями. Неизвестные константы скоростей оцениваются путем минимизации квадратичного отклонения между расчетным и экспериментальным выходами цинка, что сокращает объем необходимых лабораторных исследований. Прикладным результатом расчетов также является возможность прогнозирования выхода осаждаемого металлического порошка. Сверка с опубликованными данными при плотностях тока 125–500 А/м² показывает относительную погрешность менее 5 % после 60 мин электролиза и подтверждает, что эффекты зародышеобразования преобладают только на самых ранних стадиях. Таким образом, этот подход предлагает эффективный инструмент для параметризации и оптимизации процессов электроэкстракции цинка и других металлов. При этом найденные константы скоростей могут быть использованы для расчетов по моделям большей размерности при вычислении пространственных характеристик электротехнической системы.

Ключевые слова: электроэкстракция, метод Хука–Дживса, обратная кинетическая задача, электроосаждение цинка, метод Рунге-Кутты.

Благодарность. Исследование было проведено при поддержке Российского научного фонда (проект № 25–21–00453).

Цитирование: Кашапов Н. Ф. Алгоритм оптимизации параметров для электроэкстракции металла на примере цинка / Н. Ф. Кашапов, Л. Н. Кашапов, В. Ю. Чебакова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(1). С. 92–105. EDN: APHBFS

Introduction

Annually the world generates a large amount of industrial waste containing heavy metals, especially due to ferrous and non-ferrous metallurgy and metalworking. These materials are usually classified as hazardous due to the possibility of the leaching heavy toxic elements during periods of long-term

storage. At the same time, due to the rather high value of non-ferrous metals, their rational use is attracting more and more interest.

One of the recycling methods being used is electroextraction of metal powder from alkaline electrolytes. The precipitation of metal powders in hydroelectrometallurgical processes, as well as the properties and the resulting cathode deposit, are all influenced by a set of parameters including ones such as: electrolyte concentration, temperature, the density of applied current, the material making up the electrode and electrolyte acidity. As a result, a large number of experiments are necessary to identify the optimal parameters necessary to determine the maximum performance level while maintaining specific degrees of energy consumption.

In the study [1], research was carried out on processes involved in the electrodeposition of Pd, Rh and PdRh in alcohol solutions and alcohol solutions under the presence of impurities in the form of aldehydes (formaldehyde, acetaldehyde). The density of the deposited coating and the size of the resulting nanoparticles were also estimated.

This paper [2] describes the following processes: electroextractions of cobalt, which leads to a decrease in manganese impurities from sulfate solutions of cobalt (II) and manganese (II).

In the article [3], a proposal is made for the optimization of the process for obtaining enriched boron from boron carbide scrap formed during the production of boron carbide and it is noted that electroextraction reduces the presence of impurities in the form of oxygen and carbon.

In the article [4], a proposal was made to use electroextraction to remove the residual copper content in cast iron and steel.

Laboratory studies [5] were carried out on the cathodic process of lead electroextraction from trilonate electrolyte obtained after the purification of solutions after the leaching of lead cakes from zinc production.

Due to the widespread use of zinc to facilitate the protection of metal from corrosion, as well as in the production of alloys and paints, it has seen wide usage as a cementing metal. The use of zinc in hybrid batteries is also an interesting area of exploitation. In this regard, in [14], a new method for creating zinc nitride hybrids for practical application as highly efficient multifunctional electrocatalysts for the process of electrocatalysis and energy storage in Zn-air batteries is proposed. Hybrid batteries based on processes where zinc deposition is present are also considered in [15, 16].

Within the context of the current study the electroextraction of zinc powder from alkaline electrolyte is also very relevant. In [17] the technology used for obtaining zinc through the processing of waste powder created by steel production is detailed, and in [18] an overview is given of work by several authors who studied the overall influence of various conditions present in the electroextraction of zinc powders from alkaline electrolytes and whose finding showed that there is no consensus on the real influence of electrolysis in terms of current output and power consumption. In [19] the current output data for the electrolysis of a sodium hydroxide solution in the presence of sodium tetrahydroxocinate obtained by leaching zinc-containing ores is presented.

When developing new technologies and optimizing ones which already exist mathematical modeling makes it possible to reduce the number of experiments by linking internal and external parameters, and thus in [6] a computer simulation of the Pd deposition carried out in ethanol is presented with calculations having been performed using the Vienna Ab-initio Simulation Package (VASP version 5.3.3).

Moving on to the precipitation of stabilized ibuprofen nanoparticles from the liquid phase, in [4] a spatial model is presented. Unfortunately however, the implementation of spatial models is quite complex and often requires large computational resources. At the same time, models made up of and containing kinetic equations, allow us to perform the initial analysis of the efficiency of the electrolyzer given the fact that Faraday's law produces overreaching yield estimates, especially when in the presence of parallel branches of step reactions.

If the values of the velocity constants of near-electrode processes are known, then the problem of predicting the yield of the deposited substance is not particularly difficult and can be calculated numerically using Runge–Kutta methods used to solve calculations with regard to systems consisting of Cauchy based calculations and tasks. An example of this in [7] is the usage of the second-order Runge-Kutta method to estimate the transient power regimes existing in a thermal reactor. In most of the cases that were analyzed in the authoring of this paper, the transient power values were comparable to the values calculated by other methods, while in all cases the relative deviations calculated were found to be below the order of 10–2.

In study [8] Runge-Kutta-Felberg method were used in studying the influence of homogeneous-heterogeneous reactions on the surface of a rotating disk subjected to solar heating while a hybrid nanofluid was flowing around it. Therefore it can be stated that the Runge-Kutta method, in combination with other methods, can be used as an integral part of formulating a numerical algorithm used in the calculation of more complex problems.

In the case when reaction rate constants are unknown, tasks involving inversion often occur, which can sometimes be reduced to problems involving optimization, for example in the case of chemical reactors [9–12] and in problems involving chemical kinetics in gases [13]. In this paper inverse problems are solved under conditions when the rate constants are unknown and the mass of the deposited metal powder is given at certain points in time. The formulation and solution to this problem has been carried out through the example of obtaining zinc powder by electrolysis of a sodium hydroxide solution containing sodium tetrahydroxocinate. In the solving of this problem, an algorithm was developed based on the Runge-Kutta method for solving system wide kinetic equations and the Hook-Jeeves direct search method for determining the rate constants of kinetic processes.

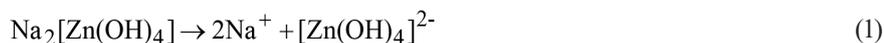
1. Task Parameter Determination Based on the Example of Zinc Electrodeposition

Based on the data in [19], we have shown that it is possible to predict the zinc yield using numerical optimization. When leaching an ore containing zinc, depending on the concentration of sodium oxide in the solution, the zinc in the electrolyte can contain both zinc oxide ZnO and the unified material $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$. It was shown in [20] that, in general, a 20 % concentration of sodium hydroxide solution NaOH was enough so that the molar ratio of hydroxyl group ions OH^- to zinc was sufficient for their existence $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$, in such a case, if the concentration of hydroxyl group ions OH^- is too small, then the compound $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$ becomes zinc oxide Zn O. Thus, the process of leaching zinc-containing ore is described as a general dissolution reaction of the following type $2\text{NaOH} + \text{Zn} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2[\text{Zn}(\text{OH})_4] + \text{H}_2$.

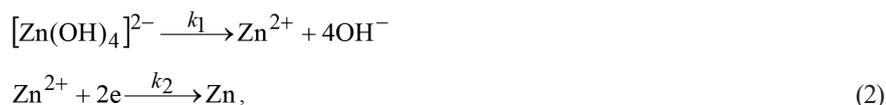
In direct connection to this, there are different opinions regarding the flow of near-electrode reactions causing the release of zinc. Thus, in review [18], which was based on the work in [21], it is shown that during the electrodeposition of zinc $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$, the compound is subject to modification into one which is hydrogenated $\text{Zn}(\text{OH})_2$, in this case zinc hydroxide is an insoluble base and, as a consequence, its presence should be noted in the resulting precipitate. However, in most studies this has not been observed.

The construction of a mathematical model is based on the following assumptions:

- 1) $\text{Na}_2[\text{Zn}(\text{OH})_4]$ in the electrolyte the ions become completely dissociated.



- 3) at the electrode, zinc is released during the following electrochemical step reactions:



where k_1, k_2 is the constant rate of the corresponding reactions.

- 5) In work shown in [18, 19], the hydrogen yield is noted together with the zinc precipitate at the cathode, so it is necessary to add the reactions of hydrogen release at the cathode to the cathodic step reactions (2). This is describe in the form presented in [22, 23]:



where k_3, k_4, k_5, k_6 shows the rate constants of the corresponding reactions.

It should be noted that the parallel emission of hydrogen leads firstly to alkalization of the near-electrode layer, which in turn can lead (under certain values of the hydrogen index), to the precipitation of hydroxides or oxalates in relation to the deposited metal, something which was possibly observed in [21]. Secondly the aforementioned emission leads to the introduction of adsorbed hydrogen atoms into the growing metal precipitate. These processes lead to a change in the properties and structure of the resulting precipitate (the so-called hydrogen brittleness of the metal). One of the tasks associated with the optimization of the zinc production process is to obtain the parameters for which the hydrogen yield is minimal. Therefore, despite the principle of the independence of parallel reactions, we have included both of them in the mathematical model although the parallel reactions are not directly related to each other:

Here E_0 – shows the standard electrode potential of the reaction, but in the case of parallel reactions, it may shift, therefore in [24] it was noted that for many systems, the potential of the electrode in the reaction of cathodic metal deposition due to polarization, can be more negative than the potential of the reversible hydrogen electrode.

Despite the fact that these competing reactions are not directly related to each other, the rates of the step reactions depend on the overvoltage ratio

$$k = A \exp\left(-\frac{BE}{RT}\right) \exp\left(-\frac{\beta F E_{\text{overvoltage}}}{RT}\right).$$

Here A , B are constants from the Arrhenius equation, E signifies the activation energy, R is the universal gas constant, F is the Faraday constant, β is the surface inhomogeneity coefficient, T is the electrolyte temperature, $E_{\text{overvoltage}}$ is the overvoltage at the electrode depending on the concentrations of only those potential-determining components of the electrolyte that participate in electrode reactions at this electrode

$$E_{\text{overvoltage}} = \frac{RT}{nF} \ln\left(C_{\text{Zn}^{2+}} C_{\text{H}^+} / C_{\text{H}} C_{\text{Zn}}\right).$$

Here $C_{\text{Zn}^{2+}}$, C_{H^+} , C_{Zn} , C_{H} shows the n -charge values, the concentrations of ions, atoms and zinc, respectively.

Another factor affecting the rate of solid product deposition is the nature of the deposited coating, namely whether it is porous or a solid continuous layer. In the case of a porous film, it has been shown not to provide resistance to reagents suitable for the interface of the medium and does not affect the reaction rate; in the case of a non-porous film, the resistance of the boundary layer can be disregarded, when considering the main resistance of the layer of the released product [25]. Moreover, if the process

is controlled by diffusion through the boundary layer, then the speed of the process $\omega = \frac{D}{\delta} SC$, where

δ is the thickness of the product layer and S is the area of the working electrode. S - is the thickness of the product layer in the approximation of the solution of the Yander equation and can be considered

proportional to time: $\frac{\partial \delta}{\partial t} = \frac{K}{t}$ and $\delta^2 = 2Kt$.

The structure of a metal deposit is determined by a number of factors, such as the composition of the solution, the presence of impurities in that solution, preliminary surface preparation, current density, etc. In research [26] the results of a study of the kinetics of leaching low-grade zinc silicate ore with sulfuric acid are presented and it is shown that the rate of the process is determined by the diffusion through the layer. In [27] the effect of additives on the structure of the selected layer Zn (porous) is shown and it is stated that at a sufficient current density, the deposition process is a reaction with a controlled transfer of mass. The paper also presents photos of the surface at different current densities during the electrolysis of a solution NaOH c at concentrations of 240 g/l and c 25 g/l at a temperature of 35C. The spongy and porous nature of the deposited zinc coating was also noted in [28]. Therefore, the deposition of a porous film is used to simulate zinc deposition.

Thus, the mathematical model consists of a system describing electrochemical stepwise cathode reactions and has been calculated as being thus:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial C_{H_2O}}{\partial t} = -k_3 C_{H_2O} \\ \frac{\partial C_{H^+}}{\partial t} = k_3 C_{H_2O} - k_5 C_{H^+} C_{Zn} C_H / (C_{Zn} + C_{H^+}) \\ \frac{\partial C_H}{\partial t} = k_5 C_{H^+} C_{Zn} C_H / (C_{Zn} + C_{H^+}) - k_6 C_{H^+} C_{H^+} \\ \frac{\partial C_{H_2}}{\partial t} = k_6 C_{H^+} C_{H^+} \\ \frac{\partial C_{Zn(OH)_4^{2-}}}{\partial t} = \frac{D_{Zn(OH)_4^{2-}}}{2Kt} \left(C_{Zn(OH)_4^{2-}} - C_0 \right) k_7 - k_1 C_{Zn} C_H C_{Zn(OH)_4^{2-}} / (C_{Zn^{2+}} + C_{H^+}) \\ \frac{\partial C_{Zn^{2+}}}{\partial t} = k_1 C_{Zn} C_H C_{Zn(OH)_4^{2-}} / (C_{Zn^{2+}} + C_{H^+}) - k_2 C_{Zn^{2+}} \\ \frac{\partial C_{Zn}}{\partial t} = k_2 C_{Zn^{2+}} \end{array} \right. \quad (4)$$

Here $D_{Zn(OH)_4^{2-}}$ is the diffusion of sediment ions $[Zn(OH)_4]^{2-}$ through a porous film, C_0 is the concentration of these ions within the volume of the electrolyte.

This notation of the kinetic equations described by the solution of Cauchy problems implies that the reaction rate constants are positive, $i=1, \dots, 7$, in the proportionality coefficient K , and the concentration values, $j=\{,,\}$.

To calculate the mass of deposited zinc sludge, calculations are done based on zinc concentration and film volume

$$M_{Zn} = C_{Zn} S \sqrt{2KT} \times 65,38, \quad (5)$$

where T is the final time of the calculations.

The process of water association $H^+ + OH^- \xrightarrow{k_4} H_2O$ is not taken into account in this model since the calculations and analysis of the rates of step reactions performed in [23] in predicting the cathodic yield of hydrogen during the electrolysis of an alkaline electrolyte showed a very small value in the constant that differed very little from the zero constant k^4 .

When setting the initial conditions on the state of the system before applying voltage we operated under the belief that sodium hydroxide, as well as sodium tetrahydroxocinate, completely dissociate into ions. Thus, the hydroxyl group is present in the electrolyte both in the free state OH^- and in the bound state $[Zn(OH)_4]^{2-}$, in this case, the bound state is determined by the concentration of zinc received from the ore. The concentration of positive ions is calculated from the ionic production of water. The concentration of hydrogen molecules and atoms and the released zinc is considered “zero” at the initial time marker. When choosing the initial approximations for the rates of constant near-electrode processes, we took into account that in the case of two competing chains of near-cathode reactions, one of which proceeds with the release of a solid phase, more complex kinetic regularities are observed. Whereas when conducting calculations associated with the release of the gas phase, which is characterized by only one chain of step reactions and when the initial approximation of the reaction rates can be selected based on the ratio between the rates of step reactions, stoichiometric numbers and the rate of limiting reaction [22, 23].

From the experiments the known output data on the current of the released substances at certain points in time can be shown as being: $l=1, \dots, n$.

The solution of the problem of finding the rate constants of near-cathode electrochemical processes and predicting the output is based on minimizing the functional:

$$\sum_{l=1}^n \sum_{v=1}^m \left(C_{l,v}^{\text{experiments}} - C_{l,v}^{\text{calculation}} \right)^2.$$

Here l it is responsible for the summation over time, v is responsible for the summation of substances whose concentrations are known. Ideally, it is desirable to have data for both hydrogen and the mass of the precipitated sediment, but as a rule, this is the mass of the deposited substance at several different time points and the functional takes the form of:

$$M(K, k_1, \dots, k_7) = \sum_{i=1}^n \left(M_{Zn,i}^{\text{experiments}} - M_{Zn,i}^{\text{calculation}} \right)^2 \quad (6)$$

2. Method for Solution

In [22, 23], the calculations presented show the parameters of gas release during electrolysis for the case of a single near-electrode reaction of substance release in the gas phase, while there was no more than a 10 % deviation of the actual predicted values of the released gas concentration as opposed to the experimental data.

The algorithm that the authors have proposed, in contrast to well-known statistical methods, such as the construction of regression models and interpolation methods, such as splines, allows us to determine the predicted values of the mass of zinc using a smaller number of experiments. This relates to not only the form of functional dependence with fitting coefficients, but allows for the direct evaluation of: the contributions of electrochemical processes, the identification of limiting processes and obtaining boundary conditions for equations calculating the concentration of components of the electrolyte in volume, all directly based on the theory of electrochemical processes.

In the current work the application of the numerical optimization method to solving the inverse problem that arises when predicting the current yield of a substance in the solid phase when in the presence of two parallel near-cathode reactions that are not directly related to each other, and by using the example of zinc deposition with concomitant hydrogen release, is shown.

The proposed algorithm is based on the Hook-Jeeves method of direct search, supplemented by constraint checking, and the Runge-Kutta method applied to solving a kinetic system of equations describing stepwise electrochemical reactions.

The Hook-Jeeves method refers to direct search methods and relies directly on the value of the functional from which the minimum is searched. It occurs iteratively and includes two stages.

The first stage consists of an exploratory search around the base point $(K, k_1, \dots, k_i, \dots, k_7)$ by the increment vector, $H(h, h_1, \dots, h_7)$ where h_i is the step along the coordinate, $k_i, i = 1, \dots, 7$. For the implementation of this stage, for each individual coordinate the values of the functional (6) are calculated at three points: the direct points $g(K, k_1, \dots, k_i, \dots, k_7)$ and the points separated from it by one step along the coordinate under study. Then the point at which the functional takes the minimum value is used as a new base point. These iterations continue until the reference point stops changing. At the same time, the calculation algorithm assumes that the point where the coordinate value takes a negative

value or the values of any of the concentrations taking a negative value during the calculation, are then excluded from consideration.

For example, for the coordinate responsible for the proportionality coefficient K these are the points $g(K, k_1, \dots, k_i, \dots, k_7)$, $g_1(K, k_1, \dots, k_i, \dots, k_7)$, $g_2(K, k_1, \dots, k_i, \dots, k_7)$, here $K - h \geq 0$. To calculate the functional (6) at these points $(K, k_1, \dots, k_i, \dots, k_7)$, $M(K+h, k_1, \dots, k_i, \dots, k_7)$, $M(K-h, k_1, \dots, k_i, \dots, k_7)$, through the formula for converting the concentration to mass (5) it is necessary to know the mass of the metal deposit at the moments T_l , $l=1, \dots, n$. To calculate the mass of deposited sediment $M_{Zn,l}^{calculation}$ for moments T_l , $l=1, \dots, n$ We need to solve a system of kinetic equations consisting of Cauchy problems (4). To solve this system, we used the fourth-order Runge-Kutta method with a time step of Δt ,

The system is counted up to the point in time T while preserving the zinc concentration values for all time points necessary for calculating functional (6) T_l , $l=1, \dots, n$, then, according to formula (5), we calculate the mass of the deposited sediment at these time points and calculate the functional itself (6). Further, for the new value of coordinate K we take that of the values K , $K + h$, and $K - h$ provided that $K - h \geq 0$ possesses a value of the functional (6) which accepts the minimum. The recalculations continue until the value of the coordinate K doesn't stop changing, and then we move to the next coordinate.

After calculating the last coordinate, a new point g' is obtained, which can either coincide with the original point $g' = g$ or differ from it $g' \neq g$.

Then, if the original reference point coincides with the newly obtained point $g' = g$, then we reduce the values of the components of the vector of coordinate increments and continue the search around the reference point. Otherwise, in the worst case, when $g' \neq g$, a sample search is then carried out. In it the values at which, again, the value of functional (6) is minimal are taken as the new basis point. The exit condition is a limit on the size of the components of the increment vector H .

When calculating the objective function, we used a numerical method from the Runge-Kutta method family at the fourth order of accuracy, i.e. its error rate is $O(t^4)$, where t is the time step. To search for the objective function, the Hook-Jeeves method was used. Its accuracy is determined by setting a limit on the possible deviation of the calculated parameter value from the values of the parameters that determine the minimum. Thus, the error rate of the method is represented as $\max_i(\Delta t^4, \varepsilon_i)$.

3. The Results of Numerical Calculations

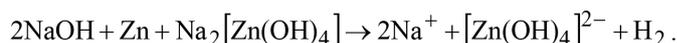
The proposed algorithm, which implements the mathematical formulation of zinc powder deposition, was verified on the full-scale experiment described in [19]. It investigated the effect of applied voltage on near-electrode processes of the electrodeposition of zinc in sodium hydroxide solutions on a stainless steel cathode. When preparing the electrolyte, the ore containing zinc oxide was calcined at 400 °C for 2 hours, then it was crushed to an approximate size of 150 μm and leached with a 20 % sodium hydroxide solution at 100 °C for 4 hours. Further the solution was injected with sodium sulfide, for precipitation of lead contained in the resulting solution. The prepared electrolyte is then ready for use after separating the liquid and solid phases. Zinc ion concentration Zn^{2+} in the prepared solution consists of 10 g/l. The working electrode was made of stainless steel and has an area of 1 cm^2 . The reference electrode was selected as a saturated calomel electrode based on the reaction between elemental mercury and mercury (I) chloride, and a graphite plate was used as a counter electrode.

We used the experimental conditions to deduce the initial conditions:

1,000 grams/l of solution gives 80 %

$C_{NaOH}|_{t=0}$ gives 20 %

Thus, $C_{NaOH}|_{t=0} = 250$ the gram/l molar mass of sodium hydroxide is 39.997 g/mol, thus $C_{NaOH}|_{t=0} = 250 \text{ g/l} : 39,997 \text{ g/mol} \approx 6,25 \text{ mol/l}$. A molar mass of zinc of 65.38 g/mol and a concentration of 10 g/l gives approximately 0.153 and following the dissolution reaction:



Thus we will have $C_{\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}} \approx 0,153 \text{ mol/l}$. At the same time 0,153 mol/l zinc binds only $2 \times 0,153 \approx 0,306 \text{ mol/l}$ the remaining $6,25 \text{ mol/l} - 0,306 \text{ mol/l} = 5,944 \text{ mol/l}$ participates in the dissociation reaction $\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{OH}^-$, as sodium hydroxide is a strong base, thus $C_{\text{OH}^-}|_{t=0} \approx 5,944 \text{ mol/l}$. The initial concentration of the hydroxyl ion is not directly involved in the near-cathode step reactions identified by us, but the ionic product of water shows that under normal conditions $C_{\text{H}^+}|_{t=0} \approx 0,168^{-14} \text{ mol/l}$. Zinc is bound by the hydroxide group, and the values of the absolute concentrations are taken close to “zero”, taking into account the fact that the deposition of metals occurs around the nuclei, the electrochemical processes of the stage of formation of the nuclei (adatoms) differ from the stage of their growth, which we are actually interested in $C_{\text{Zn}^{2+}}|_{t=0} \approx 0$, while the concentration of zinc atoms taken is

equal to “zero” $C_{\text{Zn}}|_{t=0} = 0$. From the concentration of water we get $C_{\text{H}_2\text{O}}|_{t=0} \approx 750 \frac{\text{g}}{\text{l}} : 18 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \approx 41,7 \text{ mol/l}$

, under normal conditions, water contains $C_{\text{H}_2}|_{t=0} \approx 4,29 \times 10^{-7} \text{ mol/l}$, next, we take $C_{\text{H}}|_{t=0} \approx 0$, taking into account the necessary presence of the nuclei. Since in parallel reactions, one of which takes place with the deposition of the substance in the solid phase, there is a difficulty in determining the limiting reaction, and consequently, the values of the initial approximations for the values of the rate constants of all stage reactions. We take their values to be equal to one. Later, numerical calculations showed a good level of convergence of the calculations with changes in the approximations for the initial values of the rate constants of processes.

In [19], the experimental data on the yield of zinc is shown in%, and is calculated according to

the following formula: $\eta_{\text{Zn}} = \frac{m_i - m_0}{1,22 \times I \times t} \times 100\%$ where m_0 is the initial mass of the cathode in g, m_i the

mass of the cathode with zinc deposited on it in i – at the point in time. The indicators were taken every 10 minutes, I – current strength in A, and $t=10*i/60$. Since the article [19] does not provide data on the hydrogen yield, we will construct the functional only from the known mass of deposited zinc.

The calculations were carried out using two methods and showed that the values of zinc concentrations in the calculation did not actually depend on the method of calculation and the construction of the numerical algorithm, that is, the differences in the values were insignificant. At the same time, the calculation time for the second method was shorter, although it consisted of two stages. The first method consisted in a direct calculation using the complete model described by the system (4) with the restrictions and co-relationship imposed on it (5). In the second method, calculations were

performed in two stages. At the first stage, we obtained initial approximations for the rates of stepwise reactions of zinc production:

$$\frac{\partial C_{Zn(OH)^{2-}}}{\partial t} = \frac{D_{Zn(OH)^{2-}}}{2Kt} (C_{Zn(OH)^{2-}} - C_0)k_7 - k_1 C_{Zn(OH)^{2-}}$$

$$\frac{\partial C_{Zn^{2+}}}{\partial t} = k_1 C_{Zn(OH)^{2-}} - k_2 C_{Zn^{2+}}$$

$$\frac{\partial C_{Zn}}{\partial t} = k_2 C_{Zn^{2+}}$$

At the second stage, the obtained constants were refined using the system (4). Accordingly, this suggests that for more accurate calculations, it is necessary to know the volume of released hydrogen, for example, in [19] it is noted that the release of hydrogen depended on the rate of zinc expansion, which was determined by the values of the applied current. Table 1 shows a comparison of the calculated values for the mass of deposited zinc and the experimental data of [19], where functional (6) was constructed from the mass of zinc at time points $T=10$ minutes and $T=60$ minutes. Table 2 shows the ranges of the experimentally obtained mass Zn and the calculated values obtained at a current strength of 125A at two points ($t=1$ hour and $t=10$ minutes)

The number of points with experimental values used to calculate the objective function is determined by the number of experiments performed. The influence of the points where data was taken does not have a decisive effect on the error rate, so in [23] this question was investigated

Table 1

Time, mines	Relative deviation of calculated values from theoretical values (%)			
	125 A/m ²	375 A/m ²	250 A/m ²	500 A/m ²
20	35	27	40	26
30	16	21	26	18
40	12	11	17	8
50	3	3.5	8	0
60	0	0	0	0
70	2	3	6	3
100	25	2	18	8

Table 2

T, min	Range of experimental data [19]	Calculated values
20	0.467–0.49	0.30115
40	0.976–1.03	0.8516
60	1.4945–1.6	1.564
70	1.761–1.921	1.97
100	2.49–2.6687	3.36

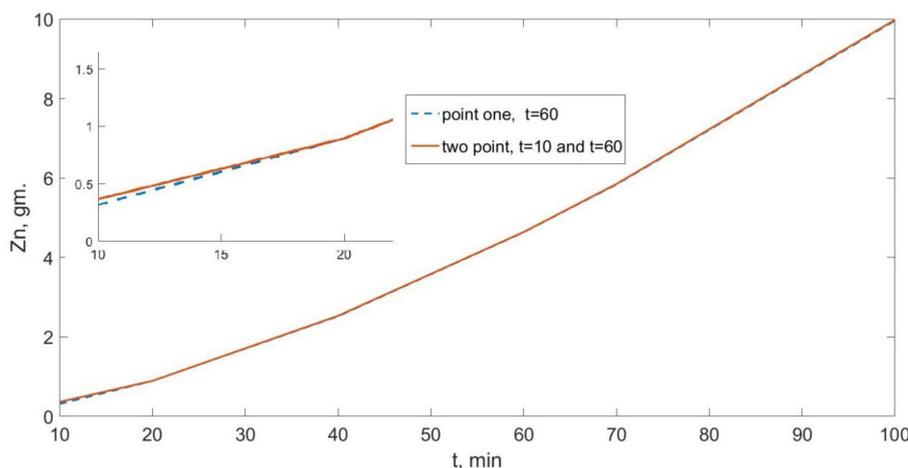


Fig. 1. Model of zinc yield during electrolysis of 20 wt% NaOH at 500 A/m²

for the processes of substance release in the gas phase, when the approximation of invariance and uniformity of the electrode area were used. When a zinc deposit is deposited on the electrode, this process is shown in Figure (1). It shows a comparison of the calculated data at a current strength of 500A in two cases: calculations were given at one point $t=1$ hour, and at two points ($t=1$ hour and $t=10$ minutes)

The calculations showed the greatest discrepancy at the beginning of the electrolysis process. From this it can be concluded that the phase of nucleation has a marked effect at the initial stage and then with the growth of zinc crystals, its influence decreases. Thus, at the initial stage of growth of zinc crystals, hydrogen is released both on the electrode and on the surface of the zinc crystals, which makes the surface strongly inhomogeneous. So we conclude that modes at current density 500 A/m² and 375 A/m², according to [19], have a lower rate of coating the electrode area with zinc than 125 % A/m² and 250 A/m² and, accordingly, a larger surface for the release of hydrogen, as well as a longer time for the release of hydrogen on the cathode material, since it is released more easily on steel than on metallic zinc. Also accordingly, more accurate information on the development of the initial stage could be obtained by taking into account data on the yield of hydrogen.

Conclusions

In this paper, we have numerically solved the inverse problem of finding the reaction rates of heterogeneous processes in the electroextraction of metal powders, taking into account the parallel release of hydrogen, using the example of zinc. To solve this problem, we propose using numerical algorithms for its solutions based on the Hook–Jeeves direct search method and the Runge-Katt method for solving systems consisting of Cauchy problems. An applied result of the calculations also provides the ability to predict the yield of the deposited metal powder. The calculation algorithm was verified on the basis of experimental data on a mass of deposited zinc and showed a high level of agreement with the experimental data. Calculations have shown that at the initial stage, the stage of the growth of nuclei has a great influence, accordingly on the difference in the rate of hydrogen formation on the surface of the steel from which the electrode is made and on the surface of the zinc crystal. At the same

time, numerical studies involving both parallel reactions have shown that the influence of the initially set concentration of zinc ions does not affect the accuracy of calculations. Thus, the stage of zinc ion formation is not a limiting one. In the future, it would be of interest for the development of the model, to study the phase of the appearance of nuclei (anatomists) and to include the most influential processes of nuclei formation in the mathematical model.

Since the rate constants depend on factors specific to the systems under direct investigation, such as the inhomogeneity and roughness of the electrode surface, the charged particle transfer coefficient and the electrolyte concentration, it seems impractical to verify the algorithm by comparing the process rates determined for other systems. At the same time, the velocity constants that are found can be used for calculations based on larger-dimensional models when calculating the spatial characteristics of an electrical system.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflicts of interest.

References

- [1] Kleinikova S.A., Levchenko M.G., Yalmaev A.B., Talagaeva N.V., Dremova N.N., Gerasimova E.V., Zolotukhina E.V. Some features of alcohols electro-oxidation process on Pd, Rh and PdRh catalysts, *Electrochim. Acta*, 022, 409, 139998.
- [2] Voropanova L.A., Khomenko L.P. Kinetic parameters of electroextraction of cobalt from aqueous solutions of cobalt and manganese sulfates, *Russ. J. Appl. Chem.*, 2007, 80 (5), 734–739.
- [3] Jain A., Anthonysamy S., Ghosh C., Ravindran T.R., Divakar R., Mohandas E., Electroextraction of boron from boron carbide scrap, *Mater. Charact.*, 2013, 84, 134–141.
- [4] Schikarski T., Avila M., Trzenschiok H., Güldenpfennig A., Peukert W., Quantitative modeling of precipitation processes, *Chem. Eng. J.*, 2022, 444, 136195.
- [5] Anisimova O.S., Sergeev V.A., Mamyachenkov S.V., Karelov S.V., Sergeeva Yu. F. “Electroextraction of lead from a lead trilonate solution, *Russ. J. Non-Ferrous Met.*, 2013, 54 (2), 132–135.
- [6] Song J., Yu D., Wu X. *et al.*, Interfacial coupling porous cobalt nitride nanosheets array with N-doped carbon as robust trifunctional electrocatalysts for water splitting and Zn-air battery, *Chem. Eng. J.*, 2022, 437, 135281.
- [7] Alismaeel Z.T., Abbar A.H., Saeed O.F. Application of central composite design for optimisation of zinc removal from aqueous solution using a flow-by fixed-bed bioelectrochemical reactor. *Sep. Purif. Technol.*, 2022, 287, 120510.
- [8] Kumar M.M., Raj C.R., Heteroatom-doped carbon-encapsulated FeP nanostructure: a multifunctional electrocatalyst for zinc-air battery and water electrolyzer, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2022, 14 (13), 15176–15188.
- [9] Boyanov B.S., Baev T.B. Utilization of zinc in powders from electric-arc furnaces in steel production, *J. Mining Metall., Sect. B*. 2009, 45 (1), 15–22.
- [10] Mamyachenkov S.V., Yakornov S.A., Anisimova O.S., Bludova D.I. Review of research on electrolytic production of zinc powders from alkaline solutions, *Vestn. Irkutsk. Gos. Tekh. Univ.*, 2019, 23 (2), 367–394.

- [11] Zhang Y., Deng J., Chen J., Yu P., Xing X. Electrowinning of zinc from sodium hydroxide solutions, *Hydrometallurgy*, 2014, 146, 59–63.
- [12] Monyoncho E. A., Steinmann S.N., Michel C. *et al.*, Ethanol electro-oxidation on palladium revisited using PM-IRRAS and DFT: why is it difficult to break the C–C bond, *ACS Catal.*, 2016, 6 (8), 4894–4906.
- [13] Babu P. R., Pal U., Sen R. N., Karthikeyan R. Runge–Kutta type-2 method for solving reactor point kinetics equations and its validation by analysing thermal and fast reactor benchmarks, *Ann. Nucl. Energy*, 2022, 170, 108979.
- [14] Alam M. W., Hussain S. G., Souayah B., Khan M. Sh., Farhan M. Numerical simulation of homogeneous–heterogeneous reactions through a hybrid nanofluid over a rotating disc, *Sustainability*, 2021, 13 (15), 8289.
- [15] Nestoridis V., Andreou I., Vayenas C. G. Optimal residence-time policy for product yield maximization in chemical reactors, *J. Optim. Theory Appl.*, 1986, 49 (2), 271–287.
- [16] Jaczson R. Optimal use of mixed catalysts for two successive chemical reactions, *J. Optim. Theory Appl.*, 1986, 2 (1), 27–39.
- [17] Li G., Liu X. Comments on ‘Optimal use of mixed catalysts for two successive chemical reactions’, *J. Optim. Theory Appl.*, 2015, 165 (2), 678–692.
- [18] Abbassi M., Chaabani A., Said L. B. An efficient chemical-reaction algorithm for multi-objective combinatorial bi-level optimization, *Eng. Optim.*, 2022, 54 (4), 665–686.
- [19] Collins L., Bhattacharya K. Optimal design of a model energy-conversion device, *Struct. Multidiscip. Optim.* 2019, 59 (2), 389–401.
- [20] Zhang Y., Deng J., Chen J., Yu P., Xing X. Leaching of zinc from calcined smithsonite using sodium hydroxide, *Hydrometallurgy*, 2013, 131, 89–92.
- [21] Brenner A. *Electrodeposition of Alloys: Principles and Practice* (Elsevier, London, 1963).
- [22] Kashapov L. N., Kashapov N. F., Chebakova V. Yu. Mathematical simulation of cathode processes during hydrogen production, *Theor. Found. Chem. Eng.*, 2024, 58 (3), 595–600.
- [23] Kashapov R. N., Kashapov L. N., Kashapov N. F., Chebakova V. Yu. Kinetics of two-phase gas-liquid areas in electrolysis processes, *High Temp.*, 2021, 59 (6), 869–876.
- [24] Bagotsky V. S. *Fundamentals of Electrochemistry*, 2nd ed. (Wiley, New York, 2006).
- [25] Dyachenko A. N., Shagalov V. V. *Chemical Kinetics of Heterogeneous Processes*, Tomsk, Tomsk Polytechnic University Press, 2014 (in Russian).
- [26] Abdel-Aal E. A. Kinetics of sulfuric acid leaching of low-grade zinc silicate ore, *Hydrometallurgy*, 2000, 55, 247–254.
- [27] Leung P. K., Ponce-De-León C., Low C. T. J., Walsh F. C. Zinc deposition and dissolution in methanesulfonic acid onto a carbon composite electrode as the negative electrode reactions in a hybrid redox-flow battery, *Electrochim. Acta*, 2011, 56 (18), 6536–6546.
- [28] Gürmen S. and Emre M. A laboratory-scale investigation of alkaline zinc electrowinning, *Miner. Eng.*, 2003, 16 (6), 559–562.

**Information and
Communication
Technologies**

**Информационно-
коммуникационные
технологии**



EDN: BCMBOQ

УДК 623.76

Analysis of Modern Methods for Recognizing Small Aerial Objects Based on Machine Learning

Evgeny N. Garin^a,
Andrey B. Gladyshev^a, Nikita V. Kopylov^b,
Vasily N. Ratushnyak^a and Elizabeth A. Nechaeva^{a*}
*^aSiberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation
^bYaroslavl Higher Military School of Air Defense
named after Marshal of the Soviet Union L. A. Govorov
Yaroslavl, Russian Federation*

Received 05.11.2025, received in revised form 09.11.2025, accepted 15.01.2026

Abstract. In recent years, the use of small unmanned aerial vehicles (UAVs) has increased, necessitating their accurate recognition against objects with similar radar characteristics, primarily birds. Despite the development of machine learning methods, the problem of reliably extracting UAV features remains relevant. The aim of this paper is to comparatively analyze existing domestic and international approaches to recognizing small aerial objects based on machine learning algorithms. This paper presents the results of evaluating the effectiveness of traditional methods (support vector machines, random forests), deep neural networks, and transformer architectures. The potential for extracting informative features from micro-Doppler time-frequency spectrograms obtained in various frequency ranges is explored. Convolutional neural networks and transformers are found to achieve recognition accuracy of up to 97 % with low noise levels; however, their use is associated with significant computational costs and the need for large volumes of training data. The article highlights the potential of hybrid neural network architectures, which integrate the advantages of various methods, to improve the accuracy and robustness of analysis. The results have practical implications for developing effective UAV recognition algorithms in real-time environments with limited computing resources. The findings expand existing understanding of the potential and limitations of modern machine learning algorithms in radar systems.

Keywords: unmanned aerial vehicles, machine learning, micro-Doppler, convolutional neural networks, transformers.

© 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: elizoveta.nechaeva@yandex.ru



Анализ современных методов распознавания малоразмерных воздушных объектов на основе машинного обучения

**Е. Н. Гарин^а, А. Б. Гладышев^а,
Н. В. Копылов^б, В. Н. Ратушняк^а, Е. А. Нечаева^а**
*^аСибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск
^бЯрославское высшее военное училище
противовоздушной обороны
имени Маршала Советского Союза Л. А. Говорова
Российская Федерация, Ярославль*

Аннотация. В последние годы возросло применение малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), что вызвало необходимость их точного распознавания на фоне объектов с аналогичными радиолокационными характеристиками, прежде всего птиц. Несмотря на развитие методов машинного обучения, задача надёжного выделения признаков БПЛА остаётся актуальной. Целью работы является сравнительный анализ существующих отечественных и зарубежных подходов к распознаванию малоразмерных воздушных объектов, основанных на алгоритмах машинного обучения. В статье представлены результаты оценки эффективности традиционных методов (метод опорных векторов, случайные леса), глубоких нейронных сетей, а также трансформерных архитектур. Исследованы возможности выделения информативных признаков из микродоплеровских время-частотных спектрограмм, полученных в различных частотных диапазонах. Установлено, что свёрточные нейронные сети и трансформеры достигают точности распознавания до 97 % при низком уровне помех, однако их применение сопряжено со значительными вычислительными затратами и необходимостью больших объёмов обучающих данных. Выделены перспективы применения гибридных нейросетевых архитектур, интегрирующих преимущества различных методов, для повышения точности и устойчивости анализа. Результаты работы имеют практическое значение для разработки эффективных алгоритмов распознавания БПЛА в условиях реального времени и ограниченных вычислительных ресурсов. Представленные выводы расширяют существующие представления о потенциале и ограничениях современных алгоритмов машинного обучения в радиолокационных системах.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, машинное обучение, микродоплер, свёрточные нейронные сети, трансформеры.

Введение

В последние годы существенно возросла интенсивность применения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), что актуализировало задачу их надежного распознавания на фоне схожих по радиолокационным характеристикам природных объектов, прежде всего птиц. Специфика летно-технических характеристик малоразмерных БПЛА обуславливает ряд дополнительных преимуществ их построения: низкая радиолокационная заметность, высота полета и скорость движения, вплоть до нулевой для мультикоптеров, малая визуальная заметность [1]. Даже если эхосигнал БПЛА и будет выделен системой селекции движущейся цели радиолокационной станции, то невозможно однозначно различить малоразмерный БПЛА и небольшую стаю птиц или одиночную птицу средних размеров. Связано это с тем, что отражения от одиночных птиц в диапазоне волн 7,5–12 см соответствуют отражению от цели с эффективной площадью рассеяния (ЭПР) 10^{-4} – 10^{-2} м² [2]. Как правило, птицы летают на высоте ниже 2000 м, что совпадает как с высотами полета, так и с ЭПР малоразмерных БПЛА. Скорость полета птиц лежит в интервале от 30 до 70 км/ч, а с учетом силы ветра радиальные скорости для птиц могут составлять до 150 км/ч, что снова совпадает с типовыми скоростями полета малоразмерных БПЛА. Таким образом, на сегодняшний день актуальной является задача по распознаванию малоразмерных БПЛА на фоне подстилающей поверхности и других малоразмерных воздушных объектов, например птиц или их стай. Использование методов распознавания на основе машинного обучения позволяет формировать информативные признаки непосредственно на основе исходных измерений, исключая необходимость предварительного ручного отбора признаков. Тем не менее данные подходы характеризуются рядом существенных ограничений, среди которых высокая чувствительность к помехам и шумам, ограниченная способность к обобщению при малом объеме обучающих выборок, а также сложность обработки данных с выраженной временной динамикой [3]. Цель работы заключается в проведении обзора и сравнительного анализа отечественных и зарубежных подходов к распознаванию малоразмерных воздушных объектов на основе машинного обучения, выявлении их достоинств и ограничений, а также формулировании перспективных направлений исследований.

В области распознавания малоразмерных воздушных объектов ранние исследования концентрировались преимущественно на извлечении вручную подобранных признаков, включающих геометрию траектории, параметры манёвренности и основные статистические характеристики микроплеровского спектра [2]. Эти признаки затем обрабатывались традиционными методами (байесовские классификаторы) и алгоритмами машинного обучения, такими как метод опорных векторов и случайные леса. Подобные подходы обладают высокой интерпретируемостью и простотой реализации, однако их эффективность существенно снижается при увеличении числа классов, усложнении условий наблюдения и появлении помех [3].

1. Свёрточная нейронная сеть (англ. convolutional neural network, СНС)

Представляет собой модель глубокого обучения. Основу СНС составляют свёрточные слои и слои подвыборки, при этом центральной является операция свёртки (рис. 1) – поэлементное умножение участков изображения на ядро фильтра с последующим суммированием результатов. В процессе работы сети происходит последовательный переход от низкоуровневых признаков

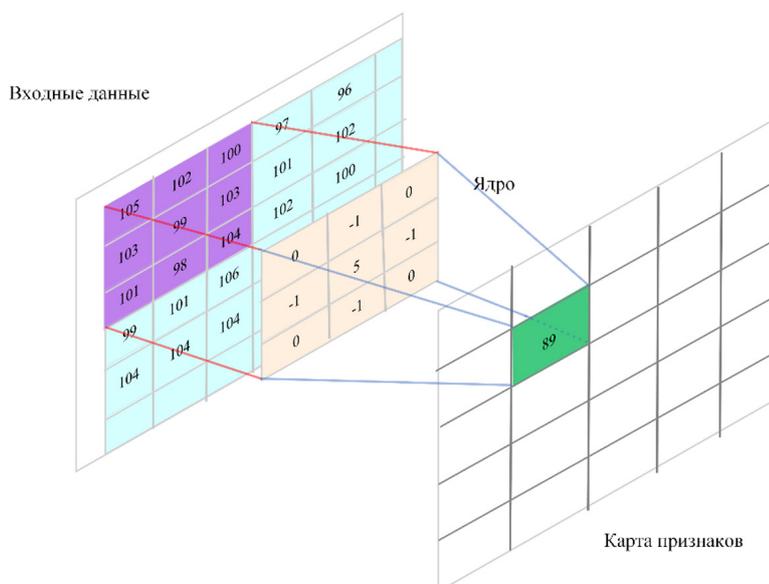


Рис. 1. Операция свертки изображения

Fig. 1. Image convolution operation

к более абстрактным представлениям путём выделения существенных деталей и отбрасывания незначимых [5].

Математически свёртка [6] между входным изображением X и ядром фильтра W выражается следующим уравнением:

$$Y(i, j) = \sum_m \sum_n X(i - m, j - n)W(m, n),$$

где $Y(i, j)$ – результат свёртки в точке (i, j) , $W(m, n)$ – параметры фильтра размером $m \times n$, а сумма выполняется по всем элементам фильтра. В процессе обучения веса фильтра W оптимизируются с использованием алгоритма обратного распространения ошибки. Одной из ключевых операций в СНС является нелинейная активация, чаще всего представленная функцией ReLU:

$$f(x) = \max(0, x),$$

что позволяет модели обучаться сложным нелинейным представлениям данных. В дополнение к свёрточным слоям часто используются слои подвыборки, такие как Max Pooling, который уменьшает размерность представления, выделяя наиболее значимые признаки:

$$Y(i, j) = \max_{m, n} X(i + m, j + n),$$

где m и n задают размер окна подвыборки.

СНС эффективно используются для обработки радиолокационных спектрограмм, изображений и видеопоследовательностей, особенно в задачах классификации БПЛА и птиц (рис. 2). Исследования показывают успешное применение одномерных, двумерных и трёхмерных СНС для извлечения информативных микродоплеровских характеристик и пространственно-

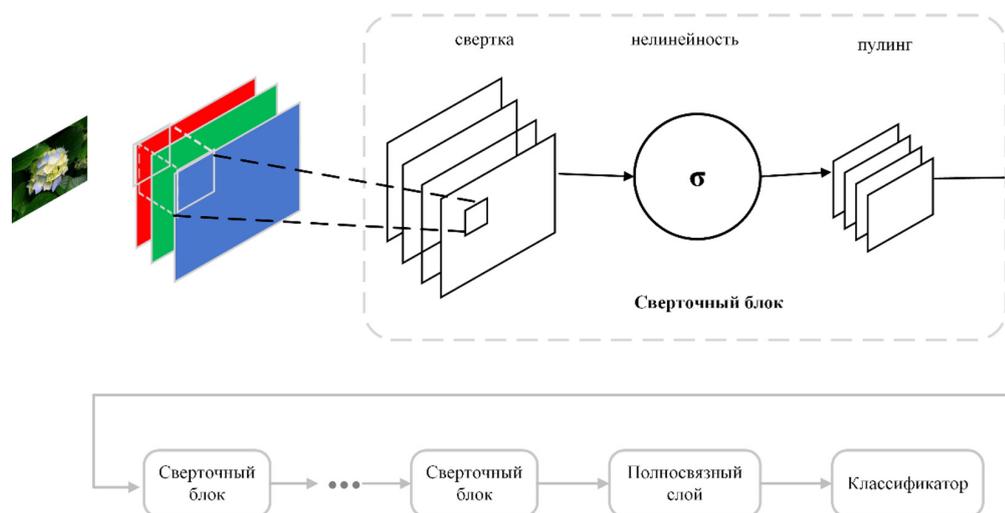


Рис. 2. Стандартная схема сверточной сети

Fig. 2. Standard convolutional network design

временного анализа [7–11]. Двумерные СНС демонстрируют высокую эффективность в обработке спектрограмм благодаря способности адаптивно выделять пространственные и временно-частотные паттерны.

Авторы в работе [10] применили как классические методы машинного обучения (метод опорных векторов), так и глубокие СНС для автоматического выделения признаков из микро-доплеровских спектрограмм, собранных радиолокатором в X-диапазоне (10 ГГц). Эксперименты показали, что глубокие СНС достигают точности порядка 95 %, тогда как точность SVM не превышала 80 %. Преимущество нейросетевых методов заключается в способности выделять и обобщать сложные признаки при высокой зашумлённости данных и изменяющихся условиях наблюдения. Недостатком является необходимость больших обучающих выборок и высокая вычислительная сложность, особенно в глубоких архитектурах, что затрудняет внедрение в реальном времени. Авторы подчёркивают важность формирования репрезентативных наборов данных для повышения устойчивости моделей.

В работе [7] предложена глубокая СНС для классификации объектов по микродоплеровским признакам, отражающим движение лопастей. Модель обучалась на спектрограммах симулированных радиолокационных сигналов от пяти типов БПЛА в X- и W-диапазонах (94 ГГц). При отношении сигнал/шум свыше 10 дБ точность классификации превышала 98 %, что подтверждает эффективность СНС в извлечении значимых признаков. Однако при ухудшении качества сигнала точность снижалась, демонстрируя чувствительность к шуму. В исследовании [8] показано, что модифицированная мульти-масштабная СНС, использующая параллельные свёртки с фильтрами разных размеров (3×3, 5×5, 7×7), достигала точности выше 92 % при классификации БПЛА и птиц. Такая архитектура позволяет извлекать признаки на разных временных и частотных масштабах, что особенно важно для анализа микродоплеров, содержащих как быстрые, так и медленные компоненты. Классические СНС в таких условиях уступают по эффективности из-за ограниченного охвата масштабов спектральной информации.

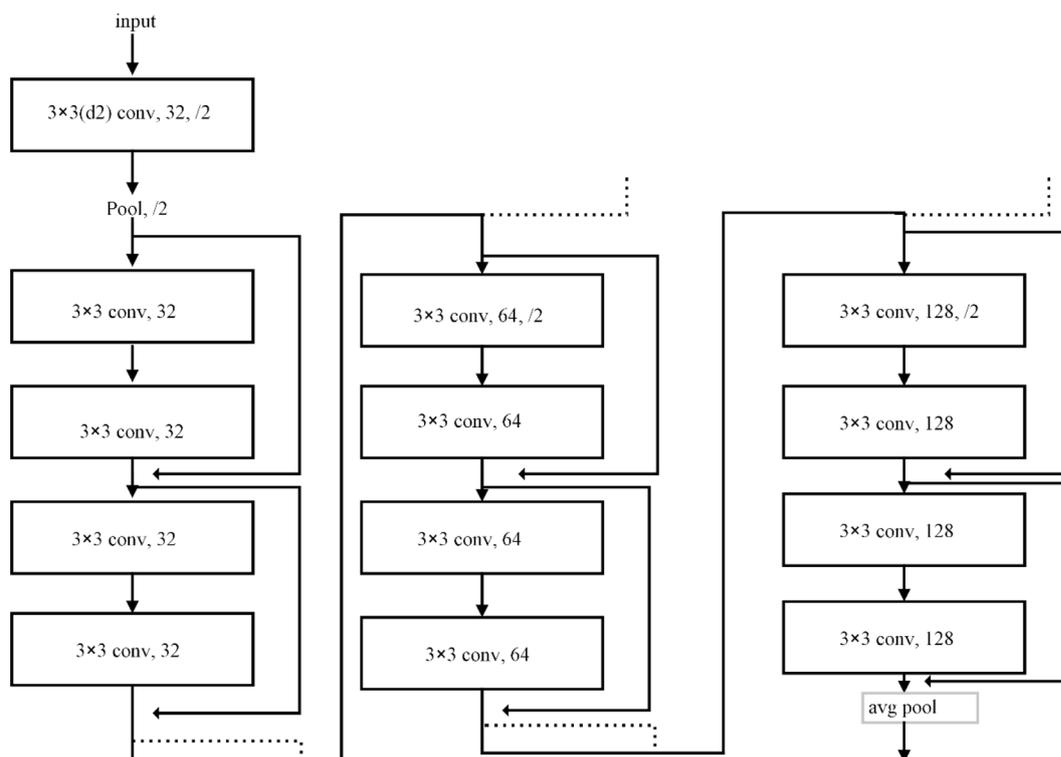


Рис. 3. Архитектура ResNet-SP

Fig. 3. ResNet-SP architecture

В работе [12] была предложена модификация ResNet-SP (Residual Networks) (рис. 3) в отличие от стандартного подхода, основанного на последовательности остаточных блоков с обычными 3×3 свёртками, использование разрежённых свёрток даёт возможность расширить рецептивное поле без увеличения числа параметров модели. Это особенно важно при работе с длинными спектрограммами, где требуется улавливать паттерны на больших интервалах, не теряя при этом способность сети обнаруживать ключевые особенности сигнала. Это решение достигло точности распознавания БПЛА около 94 %, превывсив показатели стандартных СНС и ResNet за счёт лучшего захвата длительных временных паттернов. Это открывает возможность более эффективной обработки данных в реальном времени или на ресурс-ограниченных устройствах, где критичны как точность классификации, так и скорость работы сети.

Несмотря на свою эффективность, архитектура ResNet-SP не лишена недостатков. Разрежённые свёртки могут приводить к упрощению локальной структуры спектрограммы, поскольку между элементами фильтра вводятся пропуски. Если для задачи классификации особенно важны мельчайшие детали сигнала, такая потеря локальной информации способна негативно сказаться на итоговой точности. Кроме того, хотя ResNet-SP действительно сокращает вычислительные затраты по сравнению с полными свёртками, она по-прежнему остаётся более ресурсоёмкой, чем облегчённые модели, такие как Light СНС, которые ориентированы именно на максимально возможную экономию вычислительных ресурсов. Таким образом, вы-

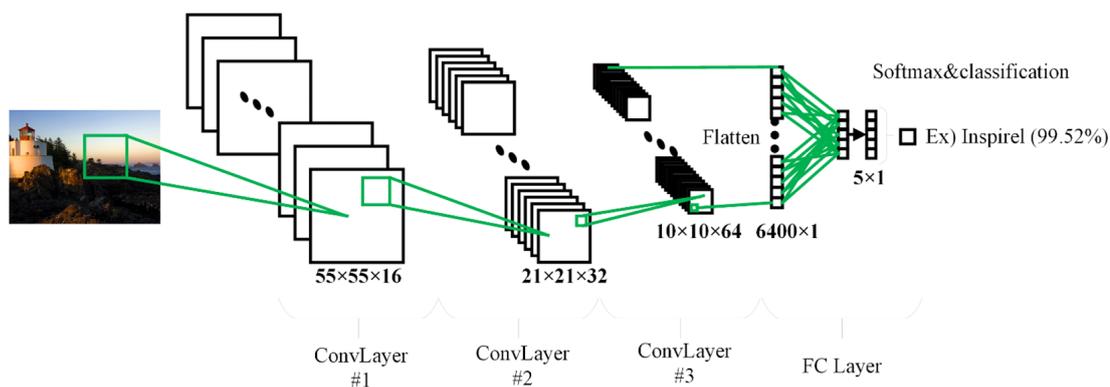


Рис. 4. Структура light свёрточной нейронной сети

Fig. 4. Structure of a light convolutional neural network

бор оптимальной архитектуры свёрточной сети зависит от требований к точности, объёмам и разнообразию обрабатываемых данных, а также от доступных аппаратных возможностей.

В статье [13] описана облегчённая архитектура свёрточной нейронной сети (Light CNN) для классификации малоразмерных БПЛА по микродоплеровским сигнатурам (рис. 4). Её отличие от традиционных моделей, например ResNet, заключается в сохранении узких свёрточных блоков при увеличении глубины, что снижает общую вычислительную нагрузку и число обучаемых параметров. Это достигается за счёт групповых свёрток, при которых входные данные делятся на подгруппы, обрабатываемые отдельными наборами фильтров. В экспериментах на реальных радиолокационных данных Light CNN обеспечила точность порядка 92 % при увеличении скорости обработки в 1,5–2 раза по сравнению с классическими глубокими сетями. Однако из-за ограниченного числа фильтров модель менее эффективна в извлечении сложных пространственно-временных паттернов и глобальных контекстов, что сказывается при анализе спектрограмм с высокой изменчивостью и помехами.

Трёхмерные свёрточные нейронные сети применяются для анализа видеопоследовательностей, поскольку они позволяют одновременно учитывать пространственные и временные связи на уровне движущихся объектов (рис. 5).

В работе [14] исследованы архитектуры R(2+1) D и ResNet18 для распознавания беспилотных летательных аппаратов и птиц. R(2+1) D сочетает двумерные пространственные и одномерные временные свёртки, что позволяет эффективно анализировать пространственно-временные признаки. Точность распознавания с использованием R(2+1) D составила около 93 %. Архитектура ResNet18 достигла сходной точности при меньших вычислительных затратах за счёт упрощённой структуры. Однако авторы отмечают, что обе архитектуры требуют значительных вычислительных ресурсов и памяти, затрудняя их применение в режиме реального времени на устройствах с ограниченными аппаратными возможностями. Подчёркнута необходимость оптимизации моделей для практического использования с большими объёмами данных.

Также рассмотрим архитектуру Google Neural Network (GoogLeNet), известную также под названием Inception Network, представляет собой глубокую архитектуру CNN, в основе кото-

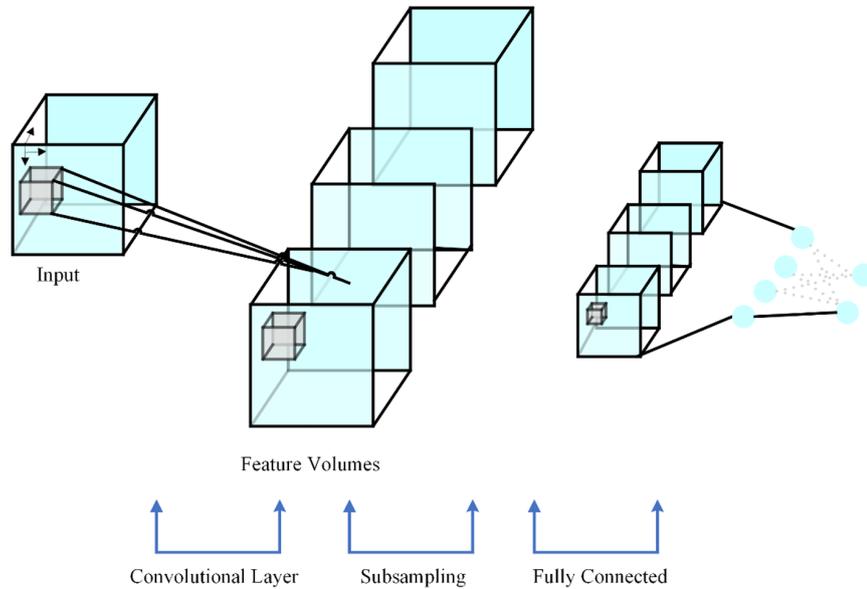


Рис. 5. Архитектура 3D-свёрточной нейронной сети

Fig. 5. 3D convolutional neural network architecture

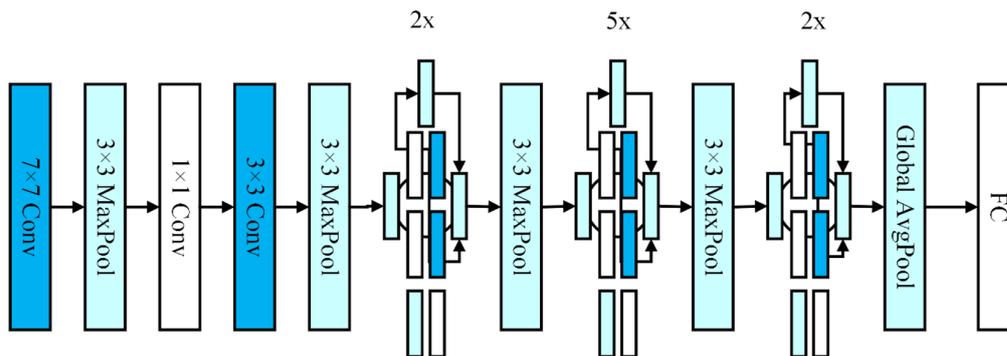


Рис. 6. Архитектура GoogLeNet

Fig. 6. GoogleNet Architecture

рой лежит использование «инцепшн»-модулей, направленных на параллельное извлечение признаков на разных уровнях абстракции. Архитектура (рис. 6) включает 22 слоя с обучаемыми параметрами и использует несколько типов свёрток в одном модуле, включая фильтры 1×1 , 3×3 и 5×5 , а также max pooling. Такая конструкция позволяет эффективно совмещать векторизованные представления различных масштабов и при этом обеспечивает высокую пропускную способность сети. В задаче классификации микроплеровских сигналов GoogLeNet демонстрирует значительное улучшение качества распознавания благодаря способности «инцепшн»-блоков обрабатывать локальные и глобальные особенности спектрограмм одновременно.

Авторами работы [15] была использована архитектура нейронных сетей GoogLeNet, а также разработана собственная серийная СНС архитектура, предназначенная специально для клас-

сификации серых изображений спектрограмм в K-диапазоне (24 ГГц) и W-диапазоне (94 ГГц). Для обучения были сформированы две отдельные базы данных, одна – с RGB-изображениями, другая – с монохромными. Данные были разделены на 4-классовые (БПЛА, птицы, помехи и шум) и 2-классовые (БПЛА и не-БПЛА) выборки. Для обучения выделялось 80 % данных, а оставшиеся 20 % использовались для валидации. При проведении экспериментов на проверочных данных точность классификации на тестовом наборе составила около 99 % для GoogLeNet и около 94–99 % для разработанной серийной сети. К преимуществам предложенных подходов можно отнести высокую точность классификации при использовании реальных данных, устойчивость модели к разнородности входных спектрограмм и способность обрабатывать данные без предварительного выделения признаков, что существенно уменьшает задержку обработки и подходит для систем реального времени. Однако недостатками метода являются необходимость большого объема и разнообразия данных для качественного обучения, чувствительность моделей к изменениям цветовых схем спектрограмм (особенно при использовании GoogLeNet), к увеличению шума, а также сложность подбора оптимальных параметров сети. Экспериментальные исследования показали, что применение GoogLeNet совместно с PST-обработкой микродоплеровских спектрограмм позволило увеличить классификационную точность БПЛА на 10 % по сравнению с классическими подходами. Эксперименты проводились на наборе реальных радиолокационных данных, охватывающих различные условия наблюдения, уровни шумов и дистанции до объектов. Таким образом, продемонстрирована эффективность интеграции современных нейросетевых архитектур с передовыми алгоритмами предварительной обработки радиолокационных данных в задаче распознавания малоразмерных воздушных объектов.

Другое исследование [16] изучало эффективность нейросетевой архитектуры GoogLeNet для классификации беспилотных летательных аппаратов. Основные преимущества GoogLeNet заключаются в её способности к параллельной обработке признаков разного масштаба и сравнительно меньшей вычислительной нагрузке по сравнению с другими глубокими моделями, такими как ResNet. В результате экспериментов было показано, что использование GoogLeNet позволило достичь аналогичной или более высокой точности классификации БПЛА при снижении общего количества параметров и вычислительных затрат примерно на 15–20 % в сравнении с архитектурой ResNet. Однако авторы подчеркнули, что модульная структура GoogLeNet, построенная на основе «инцепшн»-блоков с параллельными операциями свёрток различного размера, приводит к существенным трудностям при реализации и отладке. Это затрудняет процесс равномерного распараллеливания вычислений и требует точной настройки гиперпараметров, что усложняет адаптацию модели к новым задачам и изменяющимся условиям обработки. Также было выявлено, что сложность структуры затрудняет быстрое прототипирование и делает необходимой детальную экспертную настройку. Несмотря на перечисленные ограничения, исследование подтвердило перспективность применения GoogLeNet в задачах, где требуется эффективное выделение и объединение признаков разных масштабов при ограниченных вычислительных ресурсах.

Архитектуры YOLO, Faster R-CNN, VGG16 и AlexNet представляют собой одни из наиболее широко используемых моделей для классификации объектов, включая беспилотные летательные аппараты, на изображениях и видеопоследовательностях. YOLO реализует одно-

шаговый регрессионный подход, когда входное изображение разбивается на сетку, и каждая ячейка параллельно предсказывает несколько ограничивающих рамок и вероятность присутствия объектов в них [18]. YOLO обеспечивает почти реальное время детекции объектов за счёт одновременного определения координат и классов, что особенно важно для систем видеомониторинга (рис. 7). Однако при этом усложняется распознавание мелких объектов, что может снижать точность обнаружения БПЛА на больших расстояниях. В контрасте Faster R-CNN использует двухэтапную стратегию (RPN для областей-кандидатов и Fast R-CNN для классификации), обеспечивая более высокую точность, но уступая YOLO в скорости, что ограничивает работу в реальном времени.

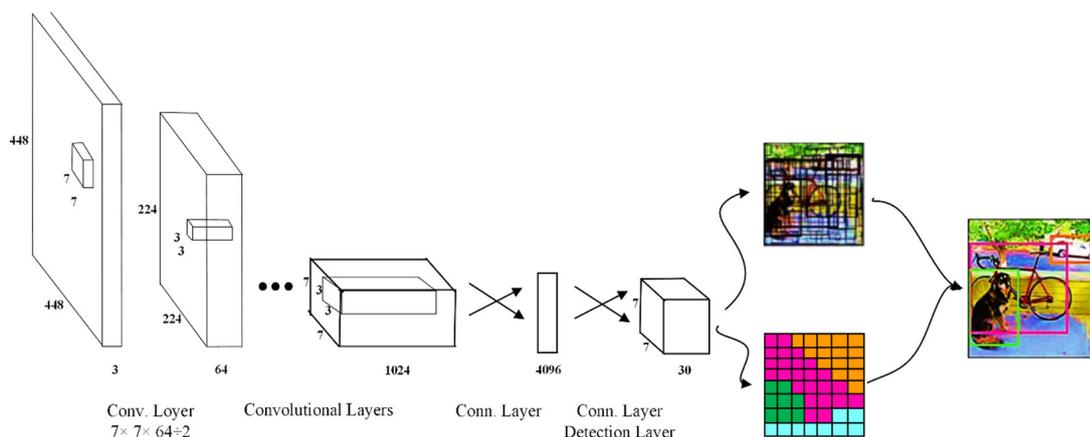


Рис. 7. Обнаружение объектов с помощью архитектуры YOLO

Fig. 7. Object Detection Using the YOLO Architecture

VGG16, состоящая из последовательных слоёв $3 \times m$, $n \times 3$ свёрток и пулинга, обладает высокой эффективностью, но характеризуется значительной вычислительной сложностью из-за большого числа параметров, затрудняющей применение в ресурсозависимых системах. AlexNet, будучи менее глубокой, быстрее, но значительно уступает современным моделям в точности. Выбор архитектуры для распознавания БПЛА определяется балансом между требуемой пропускной способностью, доступными ресурсами и спецификой целей анализа. По данным [19], YOLO показывает высокую скорость и практичность для радиолокационных систем, в то время как Faster R-CNN достигает точности около 96 %, но работает медленнее.

Таким образом, результаты работы подчёркивают, что приоритет использования той или иной архитектуры зависит от конкретных условий и требований задачи: YOLO предпочтительна в сценариях, где критически важна скорость обработки и оперативность принятия решений, тогда как Faster R-CNN более эффективна в ситуациях, требующих высокой точности классификации при менее жестких временных ограничениях.

2. Рекуррентные нейронные сети (англ. Recurrent Neural Network, РНН)

Представляют собой класс моделей, способных эффективно обрабатывать последовательные данные за счёт циклов обратной связи, позволяющих учитывать контекст предыдущих элементов при формировании текущих выходных сигналов. РНН представляет собой алгоритмизацию, где входные данные, которые поступают на вход РНН, обрабатываются в цикле, и всякий раз, когда поступает новый вектор входных данных, сеть собирает информацию из цикла и даёт свой отклик (выполняет прогноз). Такая способность к «запоминанию» особенно важна в задачах, где временная динамика играет ключевую роль, например, в анализе временных рядов, обработке сигналов или идентификации объектов по эволюции их характеристик. Однако классические архитектуры РНН подвержены проблемам исчезающего и взрывающегося градиента, существенно ограничивающим их эффективность при моделировании долгосрочных зависимостей. В связи с этим особую популярность приобрели сети с долговременной кратковременной памятью (англ. Long Short-Term Memory, LSTM) (рис. 8), где использование механизма гейтов (входного, выходного и забывающего) обеспечивает управляемое хранение и обновление информации в ячейках памяти, позволяя более надёжно отслеживать протяжённые во времени взаимосвязи [21].

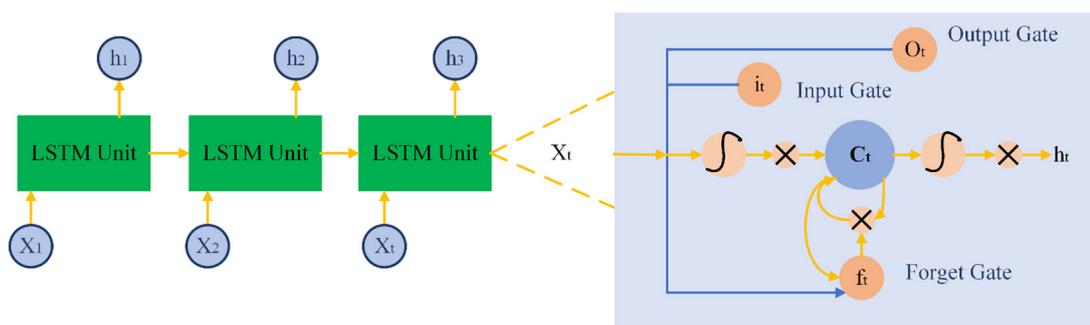


Рис. 8. Архитектура LSTM

Fig. 8. LSTM architecture

В задачах распознавания БПЛА архитектура на основе LSTM демонстрирует высокую эффективность, поскольку микроплеровские спектрограммы требуют учёта длительных зависимостей и адаптации вывода к поступающим данным. Исследования [22, 23] подтверждают, что LSTM превосходит классические СНС по устойчивости к шуму и сохраняет точность даже при слабом сигнале, учитывая накопленную информацию. Это особенно важно в условиях помех, неоднородностей и увеличенной длины временного окна, необходимого для различения объектов, таких как птицы и БПЛА. Однако высокая вычислительная сложность LSTM ограничивает её применение в реальном времени из-за роста требований к памяти и вычислениям. Для радиолокационных систем с жёсткими ограничениями по времени реакции актуальна оптимизация параметров сети, обеспечивающая баланс между скоростью обработки и точностью. Таким образом, LSTM остаётся перспективным решением для ана-

лиза сложных временных паттернов, но требует учёта аппаратных ограничений и оптимизации вычислений.

В работе [11] предложена гибридная архитектура, объединяющая ResNet и LSTM для классификации птиц и БПЛА по радиолокационным спектрограммам. ResNet извлекает пространственные признаки, а LSTM – временные зависимости. Эксперименты на реальных данных показали повышение точности на 8–12 % по сравнению с отдельными СНС или РНН, достигая 95–97 % в зависимости от уровня шума, расстояния и типа движения объектов. Однако модель отличается высокой вычислительной сложностью из-за большого числа параметров ResNet и последовательной обработки в LSTM, что ограничивает её применение в реальном времени, особенно на ресурсозависимых устройствах. Тем не менее архитектура демонстрирует высокий потенциал для задач, требующих точного пространственно-временного анализа.

В исследовании [24] проведено сравнение архитектур LSTM и Fully Convolutional Network (FCN) для классификации микродоплеровских сигналов БПЛА при низком отношении сигнал/шум. Рекуррентная сеть LSTM продемонстрировала устойчивость к шуму за счёт гейтов, эффективно выделяющих релевантные временные зависимости. При уровнях сигнал/шум 0–5 дБ точность LSTM сохранялась на уровне 88–92 %, тогда как точность FCN снижалась до 75–80 % из-за низкой адаптивности свёрток к изменяющимся условиям. Однако LSTM увеличивает время инференса в 1,5–2 раза, что ограничивает её применение в задачах реального времени. Это подчёркивает актуальность разработки облегчённых рекуррентных моделей, сочетающих высокую точность и устойчивость с меньшей вычислительной сложностью.

3. Трансформеры

Представляют собой класс современных архитектур глубокого обучения, нацеленных на параллельную обработку последовательных данных с помощью механизма самовнимания. Нейросеть-трансформер состоит из двух наборов слоев: энкодеров и декодеров, каждый из которых содержит несколько слоев. Энкодер извлекает информацию из входной последовательности, например текста. Декодер использует эту информацию для генерации элементов выходной последовательности, например перевода текста на другой язык [26].

В отличие от рекуррентных нейросетей, где учёт временной или контекстной информации осуществляется через скрытые состояния, и от свёрточных сетей, полагающихся на фильтры локальной свёртки, трансформеры позволяют моделировать глобальные взаимосвязи между элементами последовательности независимо от их положения.

Математическая основа трансформеров основана на механизме самовнимания, который вычисляет взвешенные представления входных данных, используя три основных компонента: ключи, запросы и значения. Эта операция позволяет каждому элементу последовательности динамически взвешивать важность всех остальных элементов, что критически важно при анализе видеопоследовательностей и сложных временных данных. Данный механизм особенно полезен при работе с длинными временными рядами, видеопоследовательностями и радиолокационными спектрограммами, где важно учитывать как краткосрочные, так и долгосрочные зависимости [27].

Помимо обработки текстов трансформеры всё активнее применяются в задачах компьютерного зрения, включая анализ движущихся объектов. Примером является архитектура ViT

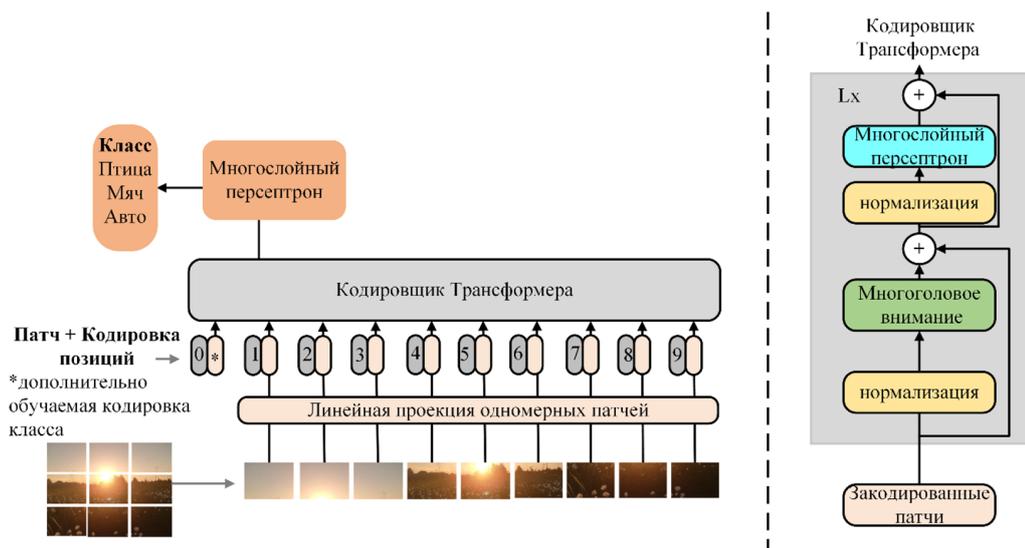


Рис. 9. Архитектура модели ViT

Fig. 9. ViT model architecture

(рис. 9), использующая факторизованное самовнимание с разделением пространственных и временных компонентов. На первом этапе изображение разбивается на фрагменты 16×16 , которые проходят через обучаемую линейную проекцию, формируя векторы фиксированной размерности [28].

К ним добавляются позиционные кодировки, сохраняющие информацию о расположении фрагментов. Особенностью является наличие 0-го класса – обучаемого, но не связанного с конкретным изображением, информация о котором встроена в архитектуру. Без позиции трансформер не способен корректно интерпретировать порядок фрагментов. Последовательность векторов подаётся на вход кодировщика, использующего слои нормализации перед блоками и остаточные соединения после них [27]. В завершение добавляется модуль классификации (MLP Head), формирующий финальный вывод модели.

Отдельное внимание привлекает класс так называемых гибридных трансформеров, они представляют собой расширение классической структуры, в которой блоки самовнимания и полносвязные слои пополняются дополнительными компонентами или модулями обработки сигналов. К таким расширениям можно отнести предварительную обработку спектрограмм, учёт статистических признаков, извлечённых из сигналов, или интеграцию сверточных фильтров для уточнения локальных деталей. Подобная мультимодальная или многокомпонентная организация делает архитектуру более гибкой и универсальной, поскольку позволяет опираться не только на исходную структуру данных, но и на заранее вычисленные характеристики. Однако подобное усложнение ведёт к росту вычислительной нагрузки и требует более тонкой настройки гиперпараметров.

Эффективность гибридных трансформерных архитектур в радиолокационных задачах наглядно продемонстрирована в исследовании [29], посвящённом идентификации беспилотных летательных аппаратов с использованием данных миллиметрового радиолокатора диапазо-

на 60 ГГц. Авторами была проведена сравнительная оценка производительности нескольких нейросетевых моделей, включая LSTM, GRU, одномерные свёрточные сети (Conv1D) и базовую трансформерную архитектуру в различных условиях помех: белого шума, шумов Парето и импульсных выбросов. В результате проведённых экспериментов базовая трансформерная модель показала наивысшую точность классификации (до 94–96 %) по сравнению с другими подходами, особенно в условиях белого шума и импульсных помех. Однако при столкновении с шумом Парето наблюдалось снижение точности (до 85–88 %) из-за нестационарности этого типа помех. Для повышения устойчивости классификации авторы разработали гибридную мультимодальную модель, интегрировавшую базовый трансформер с дополнительными статистическими признаками, такими как асимметрия и эксцесс распределения сигнала.

Гибридная архитектура с включением статистических признаков сохраняет высокую точность классификации (92–95 %) в условиях нестационарного шума, что подтверждает её потенциал для радиолокационных систем реального времени, обеспечивающих надёжную идентификацию объектов в сложной шумовой среде. В работе [30] исследовано применение видеотрансформеров (ViViT) для анализа видеоданных, включая задачи, связанные с беспилотными летательными аппаратами. ViViT эффективно обрабатывает пространственно-временные признаки, обеспечивая точность распознавания действий и траекторий объектов на уровне 93–95 % при высокой динамике сцен, изменениях освещения и частичном перекрытии. Особенно эффективны ViViT в идентификации манёвров БПЛА за счёт отказа от рекуррентных механизмов и способности к одновременной обработке пространственно-временной информации. Результаты подтверждают применимость трансформерных моделей для задач мониторинга и анализа поведения беспилотных систем в динамичной среде. Преимущество гибридных трансформеров – в интеграции разнородных признаков, что позволяет точнее моделировать сложные процессы. Однако такие модели требуют значительных вычислительных ресурсов и объёмных обучающих выборок, а также подвержены переобучению при неудачном выборе гиперпараметров или недостаточной репрезентативности данных.

Гибридные трансформеры объединяют различные источники данных, повышая точность описания сложных процессов и объектов. Их основу составляет механизм самовнимания, обеспечивающий глобальные зависимости и параллельную обработку, что важно для анализа видеопоследовательностей и радиолокационных сигналов в реальном времени. Однако интеграция визуальных, временных и статистических признаков усложняет подготовку обучающих выборок, увеличивает вычислительные затраты и требует тщательного подбора гиперпараметров, иначе возрастает риск переобучения. Наряду со свёрточными и рекуррентными блоками гибридные трансформеры могут включать специализированные слои для спектрального анализа, ковариационные матрицы и адаптивные фильтры, усиливая извлечение информативных признаков. Такие решения позволяют охватить как локальные, так и глобальные особенности сигнала, что особенно важно при распознавании БПЛА. При этом требуется достаточный объём данных, отражающих многообразие паттернов, а также оптимизация вычислительных процедур для поддержания высокой пропускной способности и точности распознавания [31].

В работе [32] представлен гибридный подход, реализованный в модели, обрабатывающей комплексные радиолокационные данные для классификации микроплеровских сигналов. В отличие от традиционных методов, преобразующих сигнал в действительную часть или мо-

дуль и фазу, архитектура сохраняет комплексное представление, что критично для учёта фазовой информации о движении и структуре объектов. Применение комплекснозначных свёрток и весов позволяет точнее моделировать амплитудно-фазовые характеристики сигнала, повышая точность распознавания в условиях шума и неоднородности. Такая модель демонстрирует потенциал комплекснозначных нейросетей в улучшении извлечения и интерпретации признаков, недоступных при использовании только реальных величин.

Заключение

Анализ современных методов распознавания малоразмерных воздушных объектов на основе машинного обучения показывает перспективность и эффективность гибридных архитектур глубоких нейронных сетей. Основное достоинство таких подходов заключается в интеграции различных методов обработки данных: свёрточных и рекуррентных сетей, трансформерных архитектур, комплекснозначных моделей и специализированных математических преобразований, включая механизмы внимания и спектрального анализа. Это позволяет одновременно извлекать пространственные, временные, спектральные и фазовые признаки сигналов, что критически важно при работе с микроплеровскими спектрограммами и видеопоследовательностями, обладающими высокой степенью сложности и значительным уровнем шумов. Однако в существующих исследованиях остаётся выраженный научный пробел, обусловленный недостаточным вниманием к интеграции различных нейросетевых подходов. В частности, отдельные исследования часто концентрируются на применении одного типа архитектур, игнорируя потенциал их совместного использования, что ограничивает возможности разработки универсальных и эффективных решений. Перспективными примерами гибридных решений являются комбинации таких сетей, как ResNet и LSTM, трансформерные модели типа ViViT и архитектуры с внедрением механизмов внимания, учитывающих временные и пространственные свойства входных данных.

Особо актуальным направлением является разработка способа распознавания малоразмерных БПЛА на основе гибридной нейронной сети с адаптивным пространственно-временным вниманием, особенно в низкочастотном радиолокационном диапазоне (3–10 ГГц). Это направление пока ещё мало изучено, однако является чрезвычайно актуальным с точки зрения практической востребованности и возможности обеспечения необходимой вероятности правильного распознавания малозаметных воздушных объектов в существующих и перспективных радиолокационных системах.

Таким образом, приоритетными направлениями дальнейших исследований являются:

- разработка новых гибридных нейросетевых архитектур, способных интегрировать преимущества различных подходов и эффективно анализировать разнородные данные;
- повышение вероятности правильного распознавания воздушных объектов за счёт совершенствования алгоритмов обучения и адаптивных механизмов обработки шумовых сигналов;
- оптимизация вычислительной сложности нейронных моделей для обеспечения их работы в режиме реального времени;
- проведение исследований и практическое внедрение гибридных моделей в низкочастотных радиолокационных системах, наиболее востребованных в реальных условиях эксплуатации.

Реализация указанных направлений позволит существенно расширить возможности современных радиолокационных систем по распознаванию малоразмерных воздушных объектов, повысить их эффективность и обеспечить успешное применение в широком спектре практических задач.

Список литературы / References

- [1] Ерёмин Г.В., Гаврилов А.Д., Назарчук И.И. Малоразмерные беспилотники – новая проблема для ПВО. *Арсенал Отечества*, 2014, 4, 42–59. [Eryomin G.V., Gavrilov A.D., Nazarchuk I.I. Small Unmanned Aerial Vehicles – A New Problem for Air Defense, *Arsenal Otechestva*, 2014, 4, 42–59 (in Russian)]
- [2] Бакулев П.А., Степин В.М. *Методы и устройства селекции движущихся целей*. М.: Радио и связь, 1986, 288 с. [Bakulev P.A., Stepin V.M. *Methods and Devices for Moving Target Selection*. Moscow, 1986, 288 p. (in Russian)]
- [3] Акинин М.В., Никифоров М.Б., Таганов А.И. *Нейросетевые системы искусственного интеллекта в задачах обработки изображений*. М., 2017, 151 с. [Akinin M.V., Nikiforov M.B., Taganov A.I. *Neural Network-Based Artificial Intelligence Systems in Image Processing Tasks*, Moscow, 2017, 151 p. (in Russian)]
- [4] Гелиг А.Х., Матвеев А.С. *Введение в математическую теорию обучаемых распознающих систем и нейронных сетей*. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУ, 2014, 224 с. [Gelig A. Kh., Matveev A.S. *Introduction to the Mathematical Theory of Trainable Recognition Systems and Neural Networks*. St. Petersburg: St. Petersburg State University Press, 2014, 224 p. (in Russian)]
- [5] Хайкин С. *Нейронные сети. Полный курс*. М.: Вильямс, 2016, 973 с. [Haykin S. *Neural Networks: A Comprehensive Course*. Moscow, 2016, 973 p. (in Russian)]
- [6] Ai J. A New CFAR Ship Detection Algorithm Based on 2D Joint LogNormal Distribution in SAR Images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(4), 806–810.
- [7] Raval D., Hunter E., Hudson S., Damini A., Balaji B. Convolutional Neural Networks for Classification of Drones Using Radars. *Drones*. 2021, 5(4). DOI: 10.3390/drones5040149.
- [8] Anderson R., Kwon B., Li S. Deep Learning and Information Geometry for Drone Micro-Doppler Classification, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 2021, 57(5), 3840–3852.
- [9] Chen X., Zhang H., Song J., Guan J., Li J., He Z. Micro-Motion Classification of Flying Bird and Rotor Drones via Data Augmentation and Modified Multi-Scale CHC. *Remote Sensing*, 2022, 14(5), 1107. DOI: 10.3390/rs14051107.
- [10] Ritchie M., Horne C., Peters N. Radar UAV and Bird Signature Comparisons with Micro-Doppler (Глава в книге). Доступно из авторской рукописи: *Ritchie_Bird_Drone* Chapter v13.pdf.
- [11] Smith J., Brown K. Bird and Drone Classification Using Radar Micro-Doppler Spectrogram Images and Deep Convolutional Neural Networks, *J. Radar Signal Process*, 2020, 2(1), 10–19.
- [12] Wilson R., Clarke T. Radar-Spectrogram-Based UAV Classification Using Convolutional Neural Networks, *Int. J. Microwave Wirel. Technol.*, 2021, 3(2), 30–41.
- [13] Johnson M., Davis O. Small Drone Classification with Light CHC and New Micro-Doppler Signature Extraction Method Based on A-SPC Technique, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 2020, 56(6), 4500–4512.

- [14] Carlson P., Weber L. Sequence Models for Drone vs Bird Classification, *Proc. Int. Radar Symp. (IRS)*, 2020, 245–250.
- [15] Rahman S., Robertson D. Radar micro-Doppler signatures of drones and birds at K-band and W-band. *Scientific Reports*, 2018, 8. DOI: 10.1038/s41598-018-35880-9.
- [16] Miller D., Nguyen H. Micro-Doppler Signal Representation for Drone Classification by Deep Learning, *IET Radar Sonar Navig.*, 2020, 14(12), 2001–2010.
- [17] Taylor B., Harris W., Anderson C. Classification of Drones Using Edge-Enhanced Micro-Doppler Image, *Electron. Lett.*, 2019, 55(10), 600–602.
- [18] Hasan R. H., Hassoon R. M., Aboud I. S. Yolo Versions Architecture: Review. *Int. J. of Advances in Scientific Research and Engineering*, 2023, 9(11), 73–92. DOI: 10.31695/IJASRE.2023.9.11.7.
- [19] Thompson L., Franco G., Ahmed S. Machine Learning-Based Drone Detection and Classification: State-of-the-Art in Research, *IEEE Access*, 2021, 9, 85643–85657.
- [20] Davis A., Morales S., Chang E. UAV (Unmanned Aerial Vehicles): Diverse Applications of UAV Datasets in Segmentation, Classification, Detection, and Tracking, *Remote Sens.*, 2021, 13(8), 1–18.
- [21] Чуб В. С., Маршаков Д. В. Рекуррентные нейронные сети. Обзор методов и приложений. *Технологии и техника: пути инновационного развития*, 2023, 546–559. [Chub V. S., Marshakov D. V. Recurrent Neural Networks: A Review of Methods and Applications, *Technologies and Engineering: Innovation Development Paths*, 2023, 546–559 (in Russian)]
- [22] Alsumaidae Y. A., Yaw C. T., Koh S. P., Tiong S. K., Chen C. P., Yusaf T., Abdalla A. N., Ali K., Raj A. A. Detection of Corona Faults in Switchgear by Using 1D-CHC, LSTM, and 1D-CHC–LSTM Methods. *Sensors*, 2023, 23(6), 3108. DOI: 10.3390/s23063108.
- [23] Zhao D., Jiang R., Feng M., Yang J., Wang Y., Hou X., Wang X. A deep learning algorithm based on 1D CHC–LSTM for automatic sleep staging. *Technology and Health Care*, 2022, 30(3), 323–336. DOI: 10.3233/THC-212847.
- [24] Ahmad I., Zhao L. Temporal Deep Learning for Drone Micro-Doppler Classification. *Sensors*, 2021, 21(15), 1–14.
- [25] Гопали С., Абри Ф., Сиами-Намини С., Сиами-Намини А. Сравнительное исследование методов выявления аномалий во временных рядах с использованием моделей LSTM и TCN. *Архив препринтов arXiv*, 2021 [Gopali S., Abri F., Siami-Namini S., Siami-Namini A. A Comparative Study of Anomaly Detection Methods in Time Series Using LSTM and TCN Models, *arXiv Preprint Archive*, 2021. Available at: [<https://arxiv.org/abs/2112.09293>] (in Russian)]
- [26] Трушин И. С., Алексеев А. А. Применение современных нейронных сетей в речевых технологиях для задачи разведки. *Вестник науки*, 2024, 6(75), 1209–1217. [Trushin I. S., Alekseev A. A. Application of Modern Neural Networks in Speech Technologies for Intelligence Tasks. *Science Bulletin*, 2024, 6(75), 1209–1217 (in Russian)]
- [27] Xiong R., Yang Y., He D., Zheng K., Zheng S., Xing C., Zhang H., Lan Y., Wang L. & Liu T.-Y. *On Layer Normalization in the Transformer Architecture*. Proceedings, 2020.
- [28] Гайнетдинов А. Ф. Исследование влияния трансформеров на улучшение генерации изображений. *Universum: технические науки*, 2024, 4(121) [Gainetdinov A. F. Study of the Impact of Transformers on Improving Image Generation, *Universum: Technical Sciences*, 2024, 4(121). URL: [<https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17259>]. DOI: [10.32743/UniTech.2024.121.4.17259] (in Russian)]

- [29] Miller T.J., Song Y., Edwards P. Classification of Flying Drones Using Millimeter-Wave Radar. *Int. J. Microwave Sci. Technol.*, 2020, 5(3), 100–112.
- [30] Arnab A., Dehghani M., Heigold G., Sun C., Lučić M., Schmid C. ViViT: A Video Vision Transformer. *arXiv preprint*, 2021. arXiv:2103.15691.
- [31] Malarvanan A. Hybrid Quantum Neural Network Advantage for Radar-Based Drone Detection and Classification in Low Signal-to-Noise Ratio. *arXiv preprint*, 2024. arXiv:2401.01342.
- [32] Green S., Roberts F., Kim J. Complex-Valued Neural Networks for Fully-Temporal Micro-Doppler Classification, *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.*, 2021, 32(10), 4455–4466.

EDN: WFCOEO

УДК 004.032.26

Machine Learning Methods for Solving Fire Detection Problems

Artem P. Kopytov* and Denis A. Kuzin
*Far Eastern Federal University
Vladivostok, Russian Federation*

Received 21.06.2025, received in revised form 08.11.2025, accepted 15.01.2026

Abstract. This article presents an analysis of the machine learning algorithms «Random Forest», «Logistic Regression» and «Convolutional Neural Network». A review of scientific and technical literature on the topic of the study is conducted, the key advantages and limitations of the considered algorithms are analyzed. Particular attention is paid to the application of algorithms in image classification problems, data collection and preparation of satellite images for training. The article contains a practical implementation and comparative analysis of the efficiency of the algorithms in various conditions. The purpose of the article is to provide an understanding of the mathematical foundations of the algorithms and the practical aspects of applying machine learning algorithms to detect fires in satellite images.

Keywords: logistic regression, random forest, convolutional neural network, satellite images, wildfire, spectral channels, error matrix, ROC-AUC metric.

Acknowledgements. This work was carried out as part of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the field of scientific activity under project No. FZNS-2023–0008.

Citation: Kopytov A. P. and Kuzin D. A. Machine Learning Methods for Solving Fire Detection Problems. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(1), 126–138. EDN: WFCOEO



© 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: kopytov.ap@dvfu.ru

Методы машинного обучения для решения задач по определению очагов возгорания

А. П. Копытов, Д. А. Кузин

*Дальневосточный федеральный университет
Российская Федерация, Владивосток*

Аннотация. В данной статье представлен анализ алгоритмов машинного обучения «Случайный лес», «Логистическая регрессия» и «Сверточная нейронная сеть». Проведен обзор научной и научно-технической литературы по теме исследования, проанализированы ключевые преимущества и ограничения рассмотренных алгоритмов. Особое внимание уделено применению алгоритмов в задачах классификации изображений, сбору данных и подготовке спутниковых снимков к обучению. Статья содержит практическую реализацию и сравнительный анализ эффективности алгоритмов в различных условиях. Цель статьи – предоставить понимание математических основ алгоритмов и практических аспектов применения алгоритмов машинного обучения в определении пожаров на спутниковых изображениях.

Ключевые слова: логистическая регрессия, случайный лес, сверточная нейронная сеть, спутниковые изображения, природный пожар, спектральные каналы, матрица ошибок, метрика ROC-AUC.

Благодарность. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности по проекту № FZNS-2023–0008.

Цитирование: Копытов А. П. Методы машинного обучения для решения задач по определению очагов возгорания / А. П. Копытов, Д. А. Кузин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(1). С. 126–138. EDN: WFCOEO

Введение

В России в год регистрируется от 9 до 35 тыс. лесных пожаров, охватывающих площади от 500 тыс. до нескольких млн га. Согласно данным МЧС России и Федерального агентства лесного хозяйства (Рослесхоз), с начала 1992 по конец 2018 г. в России было зарегистрировано более 630 тыс. лесных (затронувших земли лесного фонда) пожаров. Среди лидеров по масштабу охвата пожарами в России занимает Республика Саха. По данным Федерального агентства лесного хозяйства, за 2020 г. огонь охватил более 6 млн га лесных массивов, за 2021 г. – показатель приблизился к отметке 8 млн га [3].

Множество крупных городов и целых регионов оказались в опасной ситуации из-за задымления, которое продолжалось неделями. Среди причин, приведших к таким последствиям, можно назвать несвоевременное обнаружение очагов возгорания, позднее введение особого противопожарного режима и режима чрезвычайной ситуации на начальных этапах борьбы с огнём, а также аномальные погодные условия [1].

Для анализа спутниковых изображений используются различные методы и инструменты. Один из основных методов – это классификация изображений, когда спутниковые снимки делятся на категории в зависимости от типа местности или объекта. Другой метод – это измерение и анализ спектральных характеристик, когда анализируется отражательная способность различных участков поверхности Земли в разных частях электромагнитного спектра.

Современные технологии позволяют обрабатывать большие объемы данных за короткие сроки, что делает анализ изображений доступным и оперативным. Благодаря этому, специалисты могут быстро получать необходимую информацию и принимать решения на ее основе. Это особенно важно в такой области, как обнаружение чрезвычайных ситуаций. Такие технологии используют алгоритмы и машинное обучение для автоматического анализа и классификации изображений.

Отсутствие исследований в области обнаружения природных пожаров в доступных публикациях с применением алгоритмов машинного обучения, рассмотренных далее, создаёт научно-практический пробел, который необходимо восполнить для повышения эффективности систем обнаружения пожаров.

Целью данной статьи является сравнительное исследование эффективности алгоритмов логистической регрессии, случайного леса и сверточной нейронной сети в задаче классификации спутниковых изображений по признаку наличия очагов возгорания. Особое внимание уделяется влиянию отдельных спектральных каналов Landsat-8 на точность моделей.

Обзор литературы

Россия, обладая крупнейшими в мире лесными массивами, сталкивается с угрозой лесных пожаров в особенно острой форме. Ежегодно огонь уничтожает миллионы гектаров леса, нанося ущерб экосистемам, экономике и здоровью населения.

По данным Рослесхоза, в 2023 г. в России было зарегистрировано 12,8 тысячи лесных пожаров, охвативших площадь 4,6 миллиона гектаров [2]. Однако, несмотря на снижение общей площади пожаров, отдельные регионы продолжали испытывать силу стихии. Так, в Якутии возникло 823 лесных пожара на площади 1,5 миллиона гектаров, в Хабаровском крае – 821 пожар на 821,6 тысячи гектаров, а в Магаданской области – 334 пожара на 395 тысяч гектаров.

Такие масштабы лесных пожаров обусловлены сочетанием природных и антропогенных факторов. Среди природных причин выделяются аномально высокие температуры, засухи и сухие грозы.

В условиях столь масштабной угрозы особую актуальность приобретает разработка и внедрение эффективных методов раннего обнаружения и мониторинга лесных пожаров. Традиционные способы, такие как наземные наблюдения и использование авиации, часто оказываются недостаточно оперативными и охватывают ограниченные территории. В этой связи применение спутниковых данных в сочетании с методами машинного обучения представляет собой перспективное направление для автоматического обнаружения лесных пожаров, в частности в труднодоступных районах.

В данном разделе рассматривается три популярных базовых алгоритма машинного обучения – логистическая регрессия, метод случайного леса и градиентный бустинг – с точки зрения их применимости, обработки признаков и чувствительности к дисбалансу классов. В конце раздела проведен анализ сравнительных характеристик точности (accuracy, ROC-AUC, recall), вычислительная сложность и скорость обучения методов, применяемых в опубликованных исследованиях.

Логистическая регрессия

Логистическая регрессия является одним из базовых методов бинарной классификации, основанным на вероятностной модели. Она эффективна при линейной разделимости классов и обеспечивает интерпретируемость результатов.

Однако в задачах классификации спутниковых изображений, где данные часто имеют высокую размерность и сложные взаимосвязи, логистическая регрессия может демонстрировать ограниченную производительность.

Данный метод активно используется в целях предсказания пожароопасности территорий. В частности, исследование [5] демонстрирует применение логистической регрессии для прогнозирования риска природных пожаров в регионе Хазарского моря. Авторы отмечают, что модель, основанная на данном методе, достигла приемлемых результатов для метрики ROC = 87,3 %. В исследовании учитывается множество факторов – от плотности растительности и влажности почвы до расстояния до дорог и поселений. В работе [10], посвящённой лесным пожарам в Западной Греции, была реализована комплексная система оценки пожароопасности на основе климатических, географических и антропогенных факторов. Логистическая регрессия продемонстрировала высокую чувствительность при определении пожароопасных участков и использовалась как базовая модель в сравнительном анализе.

Также метод логистической регрессии является одним из основных в поиске и определении границ выгоревших территорий. В работе [4] модель использовалась для оценки принадлежности пикселей к зонам выгорания по временным рядам спутниковых индексов. Результаты показали, что логистическая регрессия сохраняет высокую интерпретируемость и стабильность при работе с ограниченными данными. В классическом исследовании [8], выполненном на снимках Landsat, логистическая регрессия была использована для классификации выгоревших участков, продемонстрировав уверенные результаты при анализе изменений в спектральных характеристиках.

Таким образом, данный подход подтверждает свою применимость как в задачах прогнозирования, так и в ретроспективной оценке последствий лесных пожаров. Однако применение данного метода с целью определения признаков пожара в реальном времени в доступных публикациях обнаружено не было, что может указывать на недостаточную разработанность данного направления. Это свидетельствует о существующем научно-практическом пробеле, связанном с адаптацией традиционных алгоритмов машинного обучения к задачам онлайн-обработки спутниковых данных.

Случайный лес

Это алгоритм машинного обучения, который используется для решения задач классификации и регрессии. Он основан на объединении множества деревьев решений для улучшения точности и устойчивости модели.

Он создаёт множество решающих деревьев и использует их для предсказания классов объектов. Каждое дерево строится на случайном подмножестве обучающих данных и случайном подмножестве признаков. В результате каждое дерево в ансамбле получается немного разным, что позволяет уменьшить эффект переобучения и повысить качество предсказаний.

Алгоритм случайного леса, основанный на ансамбле деревьев решений, продемонстрировал высокую эффективность в задачах классификации лесных пожаров. В исследовании, проведённом в Пакистане [4], модель Random Forest достигла точности 87,5 % и ROC 93,4 % при классификации лесных пожаров. В другом исследовании, проведённом в Северо-Восточной Индии, модель Random Forest достигла ROC 87 % при идентификации зон, подверженных лесным пожарам [7].

В статье «Исследование по обнаружению дыма от лесных пожаров на основе алгоритма случайного леса и метода субпиксельного картирования» [9] целью метода было определить пространственное распределение дыма на снимках спутника Himawari-8 с разрешением 2 км. Метрика ассигасы модели случайного леса, обученной и проверенной на двух изображениях лесных пожаров, составила 83,52 и 84,68 %. Однако дым имеет разную концентрацию в различных пространственных масштабах, что приводит к разным значениям коэффициента отражения пикселей. На картах результатов классификации пиксели внутри дыма классифицированы правильно, но пиксели на границе дыма часто классифицируются неправильно из-за ограничений масштаба пикселей.

В своей работе автор рассматривает дым и облака как два вида независимых конечных элементов. Благодаря такому разделению удалось установить некоторые зависимости коэффициентов отражения от рассматриваемого канала изображения спутника Himawari-8. В диапазоне видимого света и в ближнем инфракрасном диапазоне 4 (0,86 микрометров) средние значения коэффициента отражения дыма ниже, чем у облаков. Кроме того, средние значения коэффициента отражения облаков являются самыми высокими среди четырёх наземных объектов: облака, дым, растения, голые земли. Для растительности и голых земель эти значения меньше, чем у дыма. В ближнем инфракрасном диапазоне 5 средние значения коэффициента отражения голых земель выше, чем у дыма. Средние значения коэффициента отражения дыма в ближнем инфракрасном диапазоне 6 являются самыми низкими среди четырёх наземных объектов.

В другом исследовании авторов Bao Zhou, Sha Gao и других [7] взяты за основу данные изображений спутника Sentinel-2. Количество изображений в целом составило 4500, которые охватили область исследования, включающую некоторые регионы Китая. Сравнение модели случайного леса проводилось с методами, не относящимися к алгоритмам машинного обучения. Для алгоритма случайного леса авторы исследования провели оценку важности признаков, в результате чего наиболее значимыми оказались два коротковолновых инфракрасных канала и один ближний инфракрасный канал спутника Sentinel-2.

Среди пяти методов обнаружения Random Forest показал наивысшую метрику ассигасы = 86 %. Ближайший преследователь выдал значение accuracy = 75 %, что указывает на эффективность алгоритмов машинного обучения и в частности модели случайный лес.

Градиентный бустинг

Градиентный бустинг – это ансамблевый метод машинного обучения, который строит предсказательную модель в виде последовательности слабых моделей, каждая из которых корректирует ошибки предыдущих.

В исследовании, проведенном на данных спутника MODIS с охватом территорий Пиренейского полуострова, использован метод градиентного бустинга с деревьями принятия решений с целью определения выгоревших участков земной поверхности. Результаты метода сравниваются с алгоритмом логистической регрессии, обученным на том же наборе данных. Задача перед авторами статьи заключается в бинарной классификации спутниковых снимков. При сравнении алгоритмов модель логистической регрессии превзошла бустинг по метрике accuracy. Алгоритм XGBoost чаще ошибался, но реже пропускал изображения с выгоревшими участками. По итогу работы авторы делают вывод в неоднозначности использования модели градиентного бустинга в задачах обнаружения территорий, пострадавших от пожара, так как точность моделей, рассмотренных в данной работе, оказалась примерно схожей, а время, затраченное на обучение моделей, отличается в сотни раз [4].

В другой работе, проведённой в Марокко, гибридная модель Frequency Ratio-XGBoost достигла ROC 0,989 при прогнозировании подверженности лесных участков пожарам [6].

Подготовка изображений со спутника

В данной работе сбор данных, а именно спутниковых снимков, производился вручную. К сожалению, в открытых источниках не нашлось набора, удовлетворяющего задаче данного исследования.

Выбор спутника был осуществлен исходя из таких параметров, как зона покрытия Российской Федерации, относительно высокая разрешающая способность, доступность в получении данных.

Исходя из вышеперечисленных требований, было решено использовать снимки спутника Landsat 8. Спутник был разработан в сотрудничестве Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (НАСА) и Геологической службы США и запущен на орбиту в 2013 г.

Landsat-8 получает изображения в видимом диапазоне волн, в ближнем инфракрасном и в дальнем инфракрасном, с разрешением снимков от 15 до 100 метров на точку, более подробно можно посмотреть в табл. 1. Производится съемка суши и полярных регионов. В сутки

Таблица 1. Спектральные диапазоны спутника Landsat 8

Table 1. Spectral ranges of the Landsat 8 satellite

Спектральный канал		Диапазон длины волны	Разрешение, на один пиксель
Канал 1	побережья и аэрозоли (Coastal / Aerosol, New Deep Blue)	0,433–0,453 мкм	30 м
Канал 2	синий (Blue)	0,450–0,515 мкм	30 м
Канал 3	зелёный (Green)	0,525–0,600 мкм	30 м
Канал 4	красный (Red)	0,630–0,680 мкм	30 м
Канал 5	ближний ИК (Near Infrared, NIR)	0,845–0,885 мкм	30 м
Канал 6	ближний ИК (Short Wavelength Infrared, SWIR 2)	1,560–1,660 мкм	30 м
Канал 7	ближний ИК (Short Wavelength Infrared, SWIR 3)	2,100–2,300 мкм	30 м

снимается порядка 400 сцен (у спутника предыдущего поколения Landsat-7 было всего 250 сцен в день).

Сенсор OLI (Operational Land Imager, в переводе Оперативный Наземный Тепловизор) получает изображения в 9 диапазонах видимого света и ближнего ИК, TIRS (Thermal InfraRed Sensor, в переводе Тепловой Инфракрасный Датчик) – в 2 диапазонах дальнего (теплого) ИК (табл. 1).

Размер изображения Landsat 8 составляет 185 км в поперечном направлении на 180 км вдоль трассы. Разрешение одного снимка составляет 7771x7871 пиксель.

Было решено использовать метод классификации изображений на 2 группы: изображения без пожара, с наличием пожара. Так как все исходные снимки имели очаги пожаров, было принято решение классифицировать каждую часть изображения визуальнo в программе Qgis. Разметка проводилась с использованием второго, третьего и четвертого каналов спутника Landsat 8 с построением цветного изображения, а также отдельно седьмого канала, на котором отчетливо видна тепловая интенсивность.

Практическая реализация алгоритмов

Обучение моделей производилось на языке программирования python версии 3.10 с применением инструментов, рассмотренных далее.

Логистическая регрессия

В целях исследования влияния различных каналов спутникового снимка на предсказательную способность алгоритма был проведен ряд обучений логистической регрессии на каждом канале по отдельности, на комбинации из двух, а также из трех каналов.

Для оценки точности полученных алгоритмов предпочтение было отдано метрике ROC-AUC (ROC – receiver operating characteristic, AUC – area under the curve). Это всеохватывающая метрика качества классификации. Она была выбрана как основная из-за меньшего влияния дисбаланса классов.

Наивысшая метрика ROC для одного канала получена на шестом ближнем инфракрасном и составила 0,7775, матрица ошибок модели представлена на рис. 1. Метрики моделей, обученных на спектральных каналах ближнего инфракрасного диапазона, а именно пятого, шестого и седьмого каналов, находятся выше порога в 0,7. ROC моделей на остальных спектральных каналах значительно ниже. Для комбинации из двух каналов модель логистической регрессии на шестом и седьмом ближних инфракрасных каналах показала точность ROC метрики со значением 0,8336, матрица ошибок модели представлена на рис. 2. Модели, обученные на комбинациях из трех каналов, подверглись переобучению.

Важным аспектом задачи данной работы по определению природного пожара является избегание ошибочного предсказания класса с наличием пожара, так как данная ошибка и несвоевременное реагирование служб борьбы с природными стихиями может существенно сказаться на природном ландшафте и подвергнуть риску жизни людей.

Исходя из выше указанного условия, в матрице ошибок стоит обращать внимание на ошибки второго рода, то есть на значения, которым модель присвоила класс 0, а на самом деле достоверным является класс 1. С данной точки зрения обученная на комбинации 6 и 7 каналов изо-

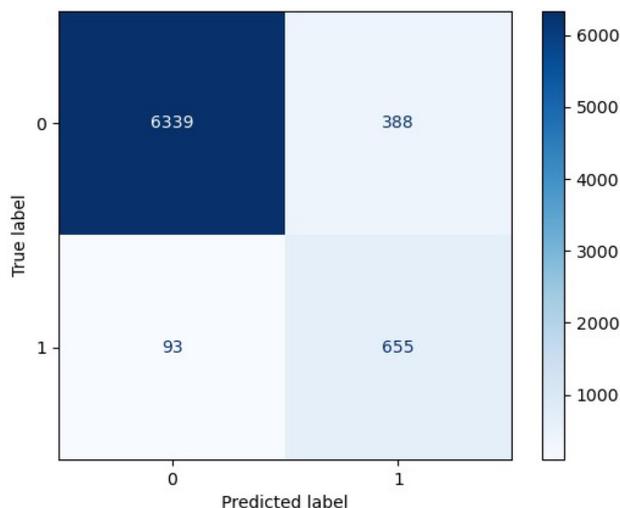


Рис. 1. Матрица ошибок модели, обученной на шестом спектральном канале изображений. Логистическая регрессия. Класс 0 – изображение без очагов пожара, класс 1 – изображение с пожаром

Fig. 1. Confusion matrix of the model trained on the sixth spectral channel of images. Logistic regression. Class 0 – image without fire sources, class 1 – image with fire

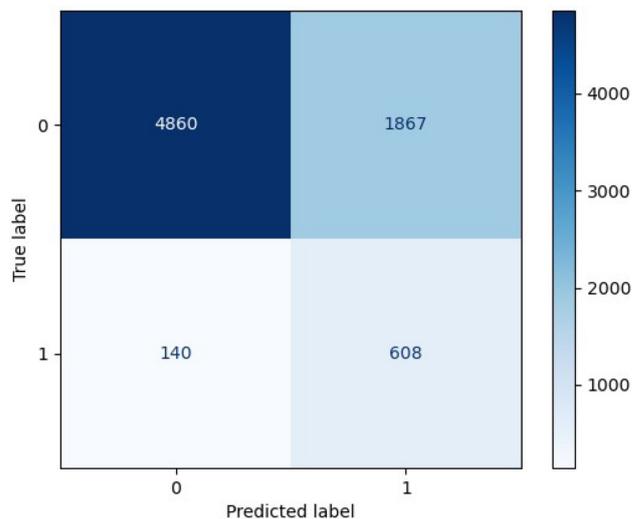


Рис. 2. Матрица ошибок модели, обученной на комбинации шестого и седьмого спектральных каналов изображения. Логистическая регрессия. Класс 0 – изображение без очагов пожара, класс 1 – изображение с пожаром

Fig. 2. Confusion matrix of the model trained on a combination of the sixth and seventh spectral channels of the image. Logistic regression. Class 0 – image without fire sources, class 1 – image with fire

бражений модель значительно превосходит модели, обученные на одном из каналов. Большое количество объектов с неверно предсказанным классом 0 говорит о высокой силе, с которой модель балансирует классы на обучении. Комбинация двух каналов повышает эффективность работы модели, количество ошибок второго рода сокращается примерно на 100 объектов, что делает ее более оптимальной для решения данной задачи.

Далее был проведен ряд проверок на тестовых изображениях с различными характеристиками и классами. По результатам рассмотренные ранее модели логистической регрессии успешно справились с определением класса изображений с пожаром, однако наличие населенных пунктов для такого класса является серьезной проблемой. В исходном наборе данных имеется много примеров с высоким инфракрасным излучением от тепловых станций, бань, зданий промышленности и металлических крыш большой площади. Примеров с пожарами возле населенных пунктов почти не наблюдалось, вследствие чего обученная модель логистической регрессии вне зависимости от спутникового канала плохо уловила закономерность и выдала очень низкую вероятность пожара на снимке.

Случайный лес

Для сравнения с уже рассмотренным алгоритмом был взят ансамблевый алгоритм случайный лес. У моделей, основанных на данном алгоритме, не возникло эффекта переобучения даже на комбинации всех спектральных каналов изображений, метрика ROC составила 0,8572. Однако модель на комбинации 2–7 каналов показала большую точность, ROC = 0,8603. Параметры моделей: 200 деревьев принятия решений, стандартная балансировка весов классов. Для первой модели максимальная глубина дерева решений 15, минимальное число изображений в листе 2, минимальное число изображений в узле 5. Для второй – максимальная глубина дерева решений 20, минимальное число изображений в листе 5, минимальное число изображений в узле 2.

Матрицы ошибок для моделей, обученных на всех семи, а также шести спектральных каналах, не включающих канал аэрозолей, представлены на рис. 3 и 4 соответственно.

На матрицах ошибок (рис. 3 и 4) можно заметить, насколько неэффективно модели предсказывают класс 1 изображений с пожаром. Две трети таких изображений ошибочно отнесены к классу 0 без пожара, такой результат предсказания не приемлем для задачи обнаружения очагов огня для оперативного тушения. Модель случайного леса, обученная на всех спектральных каналах, дает более точный прогноз по первому классу, но и больше ошибочных предсказаний для нулевого класса. Стандартные методы балансировки классов не подходят в случае с алгоритмом случайный лес.

По итогу проверки на тестовых изображениях модели не увидели очагов пожара ни на одном изображении. Обучение на всех доступных спектральных каналах изображений не спасло ситуацию, те же методы борьбы с несбалансированным набором классов, что и для алгоритма логистической регрессии, оказывают меньший эффект. В связи с полученными результатами нецелесообразно дальнейшее рассмотрение метода случайный лес в качестве средства достижения поставленной задачи.

Сверточная нейронная сеть

Альтернативой классическим методам машинного обучения выступают нейронные сети. За счет возможности обучать модель с использованием графического процессора сроки обучения значительно снижаются, что позволяет использовать более сложные архитектуры алгоритмов и повысить предсказательную способность модели.

Сверточные нейронные сети разработаны для обработки изображений. Они эффективно усваивают грани, текстуры и формы, поэтому и был выбран данный тип нейронной сети.

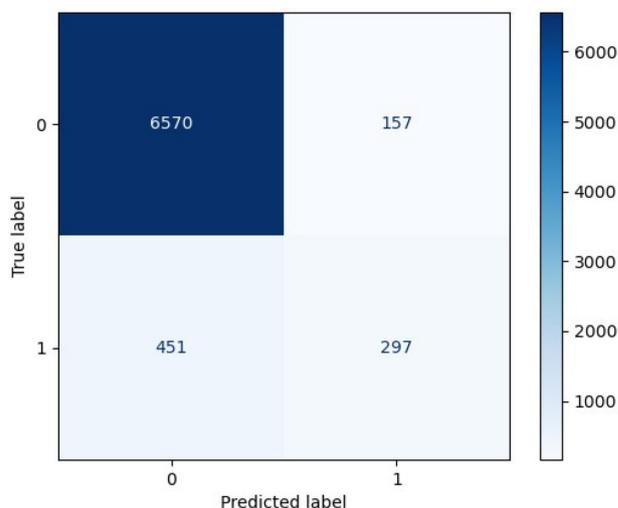


Рис. 3. Матрица ошибок модели, обученной на комбинации семи спектральных каналов изображения. Случайный лес. Класс 0 – изображение без очагов пожара, класс 1 – изображение с пожаром

Fig. 3. Confusion matrix of the model trained on a combination of seven spectral channels of the image. Random forest. Class 0 – image without fire, class 1 – image with fire

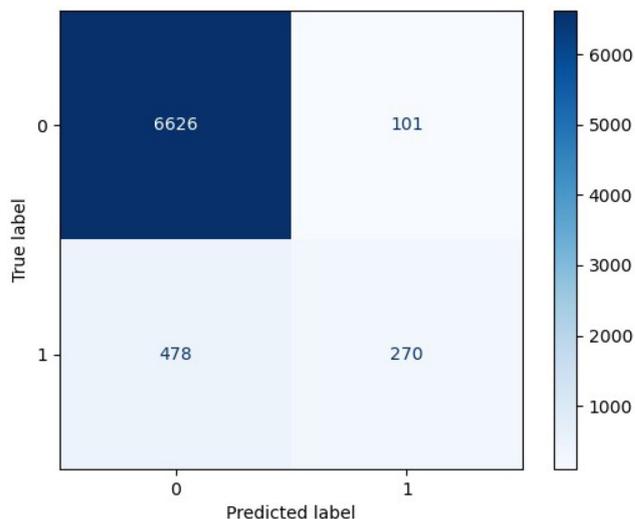


Рис. 4. Матрица ошибок модели, обученной на комбинации шести спектральных каналов изображения, не включающих первый канал. Случайный лес. Класс 0 – изображение без очагов пожара, класс 1 – изображение с пожаром

Fig. 4. Confusion matrix of the model trained on a combination of six spectral channels of the image, not including the first channel. Random forest. Class 0 – image without fire sources, class 1 – image with fire

В качестве функции активации используется ReLU (Rectified Linear Unit, выпрямительная линейная функция). Ее целью выступает задание нелинейности нейронной сети для более эффективного решения сложных задач. Данная функция лишена проблем с «затухающим градиентом». Данный термин описывает замедление процесса обучения модели из-за малых изменений весов признаков в результате прохождения через множество слоев сети.

Функция MaxPooling уменьшает размер признакового пространства, то есть оставляет более важные признаки. Данное решение помогает снизить вычислительную нагрузку.

Для оценки работы модели в процессе обучения была использована функция потерь под названием BCEWithLogitsLoss, она объединяет в себе бинарную кросс-энтропию и сигмоиду. Данная функция снижает ошибки при округлении значений и более устойчива к значениям, лежащим на границах числового диапазона. Параметр вес положительного класса (positive class weight) функции потерь позволил уравновесить перекошенность в классах изображений, тем самым увеличив значимость снимков с пожаром.

Поиск минимума функции потерь, упомянутой выше, осуществлялся оптимизатором Adam (Adaptive Moment Estimation, Адаптивная оценка моментов). Данный метод сводит функцию к локальному минимуму быстрее всех популярных оптимизаторов.

Полученное значение метрики ROC значительно превосходит точность рассмотренных ранее алгоритмов и составляет 0,97. Максимально возможная эффективность предсказаний обоих классов достигается за счет подбора порога предсказания, равного 0,67. Матрица ошибок модели с шагом обучения 0,0001 и dropout = 0,2 представлена на рис. 5.

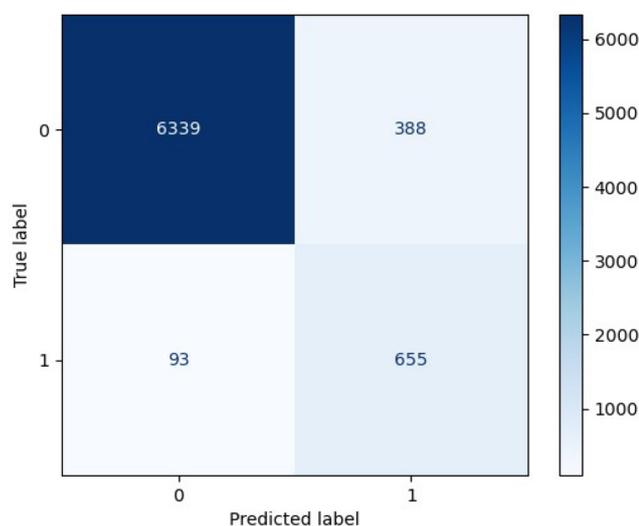


Рис. 5. Матрица ошибок модели трехслойной сверточной нейронной сети

Fig. 5. Confusion matrix of the three-layer convolutional neural network model

Финальная модель была протестирована на тестовых изображениях, для визуализации наиболее значимых областей был применен метод Grad-CAM (Gradient-weighted Class Activation Mapping). Он позволяет отобразить области изображения, на которые фокусируется модель, чтобы распознать определенный класс.

В результате проведенной проверки модель относительно точно определяет класс изображений с пожаром, однако облачность и туманы затрудняют работу и снижают эффективность предсказательной способности. Населенные пункты также сбивают модель с верного предсказания за счет вырабатываемого тепла от производств и обогрева жилищ традиционными методами.

Выводы

В исследовании было рассмотрено три алгоритма машинного обучения: логистическая регрессия, случайный лес и сверточная нейронная сеть. Первые два алгоритма работают с вектором входных чисел, последний – с двумерным пространством.

Результаты точности моделей были ожидаемы, за счет работы с двумерными массивами сверточная нейронная сеть с тремя слоями в кратчайшие сроки обучилась на исходном наборе изображений и показала отличную точность.

Остальные модели хуже справились с дисбалансом классов в наборе изображений. Для алгоритма случайный лес данная особенность является критичной, поэтому модель, обученная на этом алгоритме, в подавляющем большинстве случаев относит изображения к наиболее представленному классу без пожара.

Благодаря моделям логистической регрессии был установлен факт наибольшей значимости спектральных каналов изображения ближнего инфракрасного излучения. Наиболее тяжелым в обучении по времени и обработке данных оказался именно алгоритм логистической регрессии.

Список литературы / References

[1] Федеральное агентство лесного хозяйства Российской Федерации. Лесные пожары [Электронный ресурс]. [Federal Forestry Agency of the Russian Federation. Forest fires: Electronic resource]. Access: <https://rosleshoz.gov.ru/activity/forest-security-and-protection/fires/>

[2] Федеральное агентство лесного хозяйства Российской Федерации. Площадь лесных пожаров в России в 3,5 раза меньше, чем в прошлом году [Электронный ресурс]. [Federal Forestry Agency of the Russian Federation. The area of forest fires in Russia is 3.5 times smaller than last year: Electronic resource]. Access: <https://rosleshoz.gov.ru/news/federal/ploshchad-lesnykh-pozharov-v-rossii-v-3-5-raza-menshe-chem-v-proshlom-godu-n9801/>

[3] Федеральное агентство лесного хозяйства Российской Федерации. Площадь лесных пожаров [Электронный ресурс]. [Federal Forestry Agency of the Russian Federation. Forest fire area: Electronic resource]. Access: <https://rosleshoz.gov.ru/rates/forest-fires/area/>

[4] Militino A. F., Goyena H., Pérez-Goya U., Ugarte M. D. Logistic regression versus XGBoost for detecting burned areas using satellite images. *Environ Ecol Stat*, 2024, 31, 57–77.

[5] Fahad Shahzad, Kaleem Mehmood, Khadim Hussain, Ijlal Haidar, Shoaib Ahmad Anees, Sultan Muhammad, Jamshid Ali, Muhammad Adnan, Zhichao Wang, Zhongke Feng. Comparing machine learning algorithms to predict vegetation fire detections in Pakistan. *Fire Ecology*, 2024, 20, 57.

[6] Meriame Mohajane, Romulus Costache, Firoozeh Karimi, Quoc Bao Pham, Ali Essahlaoui, Hoang Nguyen, Giovanni Laneve, Fatiha Oudija. Application of remote sensing and machine learning algorithms for forest fire mapping in a Mediterranean area. *Ecological Indicators*, 2021, 129, 107869

[7] Mriganka Shekhar Sarkar, Bishal Kumar Majhi, Bhawna Pathak, Tridipa Biswas, Soumik Mahapatra, Devendra Kumar, Indra D. Bhatt, Jagadish C. Kuniyal, Sunil Nautiyal. Ensembling machine learning models to identify forest fire-susceptible zones in Northeast India. *Ecological Informatics*, 2024, 81, 102598.

[8] Pu Ruiliang, Gong Peng. Ruiliang, Determination of Burnt Scars Using Logistic Regression and Neural Network Techniques from a Single Post-Fire Landsat 7 ETM + Image. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2004, 7(10), 841–850.

[9] Xihao Li, Gui Zhang, Sanqing Tan, Zhigao Yang, Xin Wu. Forest Fire Smoke Detection Research Based on the Random Forest Algorithm and Sub-Pixel Mapping Method. *Forests*, 2023, 14(3), 485.

[10] Yaron Michael, David Helman, Oren Glickman, David Gabay, Steve Brenner, Itamar M. Lensky. Forecasting fire risk with machine learning and dynamic information derived from satellite vegetation index time-series. *Science of The Total Environment*, 2021, 764, 142844.