

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

**Журнал Сибирского
федерального университета
Техника и технологии**

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

2026 19 (6)

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

2026 19(6)

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 (CША), Google Scholar, ProQuest, Erihplus, READera, КиберЛенинке.

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

Журнал Сибирского федерального университета Техника и технологии

Journal of Siberian Federal University Engineering & Technologies

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

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

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

№ 6 от 24.09.2026. Индекс: 42328. Тираж: 1000 экз.

Свободная цена

Адрес редакции и издателя:

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

Отпечатано в типографии Издательства БИК СФУ

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

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

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

Подписано в печать 14.09.2026. Формат 60х90/8. Усл. печ. л. 11,1.

Уч.-изд. л. 10,6. Бумага тип. Печать офсетная. Тираж 1000 экз. Заказ № 25982.

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

CONTENTS

Researching. Design. Operating Experience

Yuri N. Bulatov, Andrey V. Kryukov, Konstantin V. Suslov and Vadim V. Kizhin Improving the Quality of Electric Power in Power Supply Systems Based on Hybrid Transformers with a Control Algorithm Using the Wavelet Transform.....	704
Nikolay K. Borodin and Vladimir A. Kulagin Development of Experimental Techniques for Research Softplc Platforms and Control Algorithms for a Heating Station	719
Viktor R. Vedruchenko and Aleksandr B. Bashurov Assessment of the Efficiency of Converting Low-Capacity Industrial Boiler Plants to Combustion of Coal-Water Suspension.....	739
Elena N. Grigorieva, Evgeniy V. Egoshin and Aleksandr A. Efimov Investigation of Physical Parameters of Pellets from Illiquid Wood.....	751
Nikolay V. Tsuglenok The Effect of the Second Law of Thermodynamics in Technical Systemst	761
Aleksei S. Timofeev, Viktor N. Timofeev, Maksim Yu. Khatsayuk, Eduard R. Vinter and Ivan V. Kizhaev Experimental Study of a Prototype Induction Channel Heater for Molten Aluminum	768
Yuriy L. Koziratskiy, Dmitriy V. Prokhorov, Anton A. Koziratskiy, Anton A. Barkalov and Vyacheslav A. Shamarin Justification of a Rational Number of Transmissions of the Laser Rangemetering System of an Anti-Aircraft Artillery Complex to Achieve Reliable Identification of UAV as Target Among Air Biological Objects and Deliberate Deceptions.....	779
Maksim V. Azarov Study of the Reduction of Backscattering of a Conformal Metasurface with Orbital Angular Momentum Under Cylindrical and Spherical Bends.....	793
Irina Yu. Botvich, Artem P. Snitserev, Mark I. Rachinskiy and Anatolii P. Shevyrnogov Mapping Soil Eluviation-Accumulation Zones Based on Unmanned and Satellite Data: A Case Study of Agricultural Lands of the EPF “Kuraginskoye” of the Federal Research Center KSC SB RAS.....	803
Math Modeling. Numerical Experiment	
Maria O. Avdeeva, Nyura Sh. Glchyan and Aleksandr S. Losev Mathematical Model for Estimating the Melt Pool Depth During 3D Printing by Selective Laser Melting Technology	814
Makhsud I. Makhmudov, Siroj S. Nurov and Uktam F. Mamirov An Energy-Saving Control System in Wastewater Aeration Processes	823

СОДЕРЖАНИЕ

Исследования. Проектирование. Опыт эксплуатации

**Ю. Н. Булатов, А. В. Крюков,
К. В. Сулов, В. В. Кижин**

Улучшение качества электроэнергии в системах электроснабжения
на основе гибридных трансформаторов с алгоритмом управления,
использующим вейвлет-преобразование..... 704

Н. К. Бородин, В. А. Кулагин

Развитие техники эксперимента исследования SoftPLC-платформы
и алгоритмов регулирования
теплового пункта 719

В. Р. Ведрученко, А. Б. Башуров

Оценка эффективности перевода промышленных котельных малой мощности
на сжигание водоугольной суспензии 739

Е. Н. Григорьева, Е. В. Егошин, А. А. Ефимов

Исследование физических показателей пеллет из неликвидной древесины..... 751

Н. В. Цугленок

Действие формулировки второго закона термодинамики в технических системах..... 761

**А. С. Тимофеев, В. Н. Тимофеев,
М. Ю. Хацаюк, Э. Р. Винтер, И. В. Кижяев**

Экспериментальные исследования прототипа индукционного канального нагревателя
для алюминиевого расплава 768

**Ю. Л. Козирацкий, Д. В. Прохоров,
А. А. Козирацкий, А. А. Баркалов, В. А. Шамарин**

Обоснование рационального числа посылок лазерной системы дальнометрирования
зенитного артиллерийского комплекса для достижения достоверного выделения БЛА
как цели среди воздушных биологических объектов и преднамеренных ложных целей..... 779

М. В. Азаров

Исследование снижения обратного рассеяния конформной метаповерхности
с орбитальным угловым моментом при цилиндрическом и сферическом изгибах 793

**И. Ю. Ботвич, А. П. Сницеров,
М. И. Рачинский, А. П. Шевырногов**

Построение карт элювиально-аккумулятивных зон почв по беспилотным и спутниковым данным
на примере сельскохозяйственных угодий ОПХ “Курагинское” ФИЦ КНЦ СО РАН..... 803

Математическое моделирование. Численный эксперимент

М. О. Авдеева, Н. Ш. Гляян, А. С. Лосев

Математическая модель оценки глубины ванны расплава в процессе 3D-печати
по технологии селективного лазерного сплавления..... 814

М. И. Махмудов, С. С. Нуров, У. Ф. Мамиров

Энергосберегающая система управления процессами аэрации сточных вод 823

**Researching. Design.
Operating Experience**

**Исследования.
Проектирование.
Опыт эксплуатации**

EDN: QVGQMW

УДК 621.311, 621.314

Improving the Quality of Electric Power in Power Supply Systems Based on Hybrid Transformers with a Control Algorithm Using the Wavelet Transform

Yuri N. Bulatov^{a*}, Andrey V. Kryukov^b,
Konstantin V. Suslov^{c, d} and Vadim V. Kizhin^a

^a*Bratsk State University*

Bratsk, Russian Federation

^b*Irkutsk State Transport University*

Irkutsk, Russian Federation

^c*Irkutsk National Research Technical University*

Irkutsk, Russian Federation

^d*National Research University «MEI»*

Moscow, Russian Federation

Received 21.01.2026, received in revised form 01.07.2026, accepted 15.07.2026

Abstract. In modern power supply systems (PSS), nonlinear loads are becoming more prevalent due to the widespread use of power electronics. This trend reduces power quality and requires the use of specialized devices, such as active (AHF) and passive harmonic filters (PHFs). One of the most effective ways to improve power quality indicators (PQI) in PSSs can be achieved using hybrid distribution transformers (HDTs), which perform voltage conversion and actively suppress harmonic distortion directly at the source. A HDT is a device that combines a conventional transformer and an active power converter, capable of regulating voltage and current in the network, enabling flexible compensation for voltage surges and higher harmonics. The objective of the research presented in this article was to develop a control system for AHFs in HDTs, which, unlike existing systems, is based on a cascade filter with a wavelet transform. Using computer modeling in Matlab/Simulink, the effectiveness of the proposed active harmonic compensation system for an industrial power system (PSS) including high-voltage and low-voltage electric motors was analyzed. The scientific novelty of the presented results lies in the application of an original approach to implementing the active harmonic compensation of a hybrid transformer, based on a cascade filter with a wavelet transform. A description of the HDT model with AHF and the proposed control system in d-q coordinates is provided. The obtained results confirmed its effectiveness. Compared to a PSS using standard transformers, the total harmonic distortion (THD) of voltage decreased by an average

© 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: bulatovyura@yandex.ru

of 67 %, while the same indicator for current decreased by 8.5 times, and the unbalance factor decreased by 31 %.

Keywords: power supply system, power quality, hybrid distribution transformer, cascade filter with wavelet transform, modeling.

Citation: Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Suslov K. V., Kizhin V. V. Improving the Quality of Electric Power in Power Supply Systems Based on Hybrid Transformers with a Control Algorithm Using the Wavelet Transform. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(6), 704–718. EDN: QVGQMW



Улучшение качества электроэнергии в системах электроснабжения на основе гибридных трансформаторов с алгоритмом управления, использующим вейвлет-преобразование

**Ю. Н. Булатов^а, А. В. Крюков^б,
К. В. Суслов^{в, г}, В. В. Кижин^а**

*^аБратский государственный университет
Российская Федерация, Братск*

*^бИркутский государственный университет путей сообщения
Российская Федерация, Иркутск*

*^вИркутский национальный исследовательский
технический университет
Российская Федерация, Иркутск*

*^гНациональный исследовательский университет «МЭИ»
Российская Федерация, Москва*

Аннотация. В современных системах электроснабжения (СЭС) начинает преобладать нелинейная нагрузка вследствие массового использования устройств на основе силовой электроники. Такая тенденция снижает качество электроэнергии и требует применения в СЭС специальных устройств, например активных (АФГ) и пассивных фильтров высших гармоник. Один из наиболее эффективных способов улучшения показателей качества электроэнергии (ПКЭ) в СЭС может быть реализован на основе гибридных распределительных трансформаторов (ГРТ), позволяющих выполнять функцию преобразования напряжения и активно подавлять гармонические искажения непосредственно в точке их возникновения. ГРТ представляет собой устройство, объединяющее классический трансформатор и активный силовой преобразователь, который способен обеспечивать регулирование напряжения и тока в сети, что дает возможность гибко компенсировать скачки напряжения и высшие гармоники. Цель представленных в статье исследований состояла в разработке системы управления АФГ ГРТ, реализованной, в отличие от известных, на основе каскадного фильтра с вейвлет-преобразованием. С помощью компьютерного моделирования в Matlab/Simulink выполнен анализ эффективности предложенной системы для активной компенсации гармоник в СЭС промышленного предприятия, включающей высоковольтные и низковольтные электродвигатели. Научная новизна представленных результатов состоит в применении оригинального подхода к реализации АФГ ГРТ, базирующегося на каскадном

фильтре с вейвлет-преобразованием. Приведено описание модели ГРТ с АФГ и предлагаемой системы регулирования в координатах d-q. Полученные результаты подтвердили ее эффективность. По сравнению с СЭС, использующей трансформаторы типовой конструкции, суммарный коэффициент гармоник напряжения уменьшился в среднем на 67 %, а аналогичный показатель для тока – в 8,5 раза, коэффициент несимметрии напряжения снизился на 31 %.

Ключевые слова: система электроснабжения, качество электроэнергии, гибридный распределительный трансформатор, каскадный фильтр с вейвлет-преобразованием, моделирование.

Цитирование: Булатов Ю. Н. Улучшение качества электроэнергии в системах электроснабжения на основе гибридных трансформаторов с алгоритмом управления, использующим вейвлет-преобразование / Ю. Н. Булатов, А. В. Крюков, К. В. Суслов, В. В. Кижин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(6). С. 704–718. EDN: QVGQMW

Введение

В современных электроэнергетических системах (ЭЭС) наблюдается значительная трансформация, в основу которой положены следующие процессы: масштабная цифровизация [1], рост распределенной генерации с образованием микросетей [2, 3], применение энергоэффективных технологий, массовое внедрение устройств на основе силовой полупроводниковой электроники. Наличие таких устройств приводит к ухудшению качества электроэнергии [4], что негативно влияет на оборудование систем электроснабжения (СЭС) и потребителей электроэнергии [5–8]. Анализ современных тенденций в области применения силовой электроники показывает, что доля электроэнергии, потребляемой электроприемниками с нелинейными вольтамперными характеристиками, достигает половины от общего электропотребления [9]. В промышленных сетях основными источниками высших гармоник (ВГ) являются **частотно-регулируемые приводы**, число которых превышает половину от общего состава электродвигателей. Выпрямители, применяемые в таких приводах, создают значительные уровни ВГ. Электронные устройства серверных ферм и центров обработки данных имеют импульсные источники питания с корректором коэффициента мощности. Их совокупный вклад в гармоническое загрязнение электрических сетей 0,4 кВ является значительным, особенно в офисных районах крупных городов. Еще одним источником служит светодиодное освещение. Дешевые комплектующие LED-ламп, не имеющие качественных входных фильтров, отличаются значительными величинами коэффициентов ВГ тока, а их массовое использование приводит к росту токов третьей гармоники, которые суммируются в нейтральном проводе трехфазных систем [10].

Средний уровень суммарного коэффициента гармонических искажений (THD) в точках общего присоединения распределительных сетей обычно не превышает нескольких процентов, однако вблизи крупных коммерческих и промышленных потребителей при пиковых режимах наблюдается локальный рост THD, достигающий двузначных значений. С ростом числа нелинейных нагрузок этот уровень может масштабно возрасти [11]. В настоящее время значения THD в СЭС многих объектов часто превышают нормативный предел, установленный нормативными документами. Последствия этих негативных явлений носят прогрессирующий характер, при этом рост гармонических искажений приводит к увеличению эксплуатационных расходов [12], простоем производства из-за отказов чувствительного оборудования, а также к финансовым потерям от штрафов за ухудшение качества электроэнергии.

Классические пассивные методы фильтрации [13, 14] не справляются с динамичным и многообразным характером ВГ, генерируемых в современных СЭС. Такие фильтры имеют

фиксированную полосу компенсации и увеличенный риск возникновения параллельного или последовательного резонанса. Это может привести к опасному усилению отдельных ВГ и росту ТНД. Активные фильтры ВГ (АФГ) [15, 16], реализующие адаптивный принцип компенсации по методу «противофазного тока», выдают результирующий ток сети, близкий к синусоидальной форме. Однако АФГ могут быть экономически неоправданны для массового применения на уровне распределительных сетей.

Поэтому актуальным направлением исследований становится разработка и внедрение интегрированных решений, сочетающих надежность пассивных элементов с гибкостью активной компенсации. Одним из наиболее перспективных устройств такого класса является гибридный распределительный трансформатор (ГРТ), способный выполнять основную функцию по преобразованию напряжения и активно подавлять гармонические искажения непосредственно в точке их возникновения [17]. ГРТ представляет собой устройство, объединяющее классический трансформатор и активный силовой преобразователь [18], который способен обеспечивать управление напряжением и током в сети [19], что позволяет гибко компенсировать скачки напряжения и ВГ [20].

Существуют различные конфигурации ГРТ [19, 21], одна из которых представляет собой трансформатор и преобразователь AC/DC/AC, включенный последовательно в цепь вторичной обмотки трансформатора. В [22] представлен базовый алгоритм управления преобразователем AC/DC/AC как последовательным источником дополнительного напряжения для компенсации ВГ и регулирования напряжения. Другая конфигурация представляет собой трансформатор с параллельным подключением к обмотке низкого напряжения конденсатора через преобразователь AC/DC (рис. 1). Представленная на этом рисунке конфигурация ГРТ использовалась в данных исследованиях.

Принцип подавления гармонических токов, применяемый в активных фильтрах гармоник и рассматриваемой конфигурации ГРТ, был впервые предложен в 1971 году и основывался на принципе компенсации магнитного потока в сердечнике трансформатора [23]. В 1976 году представлена концепция АФГ с использованием преобразователей на основе широтно-импульсной модуляции (ШИМ), получившая название «активный фильтр мощности переменного тока». Ее практическое применение ограничивалось компенсацией реактивной мощности, поскольку этот АФГ был основан на тиристорном преобразователе [24]. В 1984 году был раз-

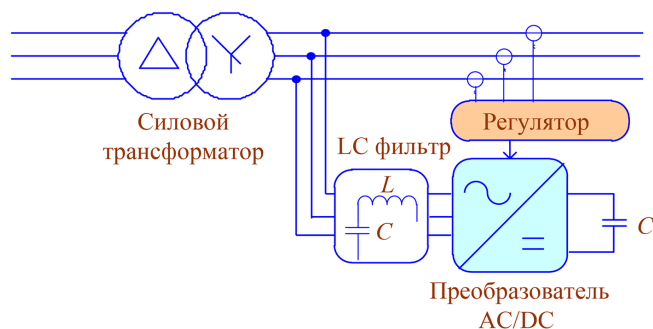


Рис. 1. Схема гибридного трансформатора

Fig. 1. Hybrid transformer diagram

работан шунтирующий активный фильтр, способный компенсировать не только реактивную мощность, но и токи ВГ. Он состоял из трехфазного преобразователя переменного тока в постоянный на основе транзисторов, работающих с ШИМ [25]. Многофункциональные устройства для регулирования качества электроэнергии трёхфазных сетей, ориентированные на стабилизацию напряжений и компенсацию реактивной мощности с подавлением нежелательных гармоник, описаны в [26, 27]. Шунтирующие АФГ [26] используют тот же принцип и способны решать проблемы с качеством электроэнергии, связанные с токами ВГ, реактивной мощностью и несимметрией.

Алгоритмы управления ШИМ активного фильтра гармоник ГРТ играют важную роль в компенсации гармонических искажений. Разработано большое число систем управления ГРТ. Составная схема управления для ГРТ улучшенной конструкции с преобразователем, установленным на стороне среднего напряжения, предложена в [28]. В этой схеме используются два составных регулятора тока и напряжения. Для каждого устройства контуры прямой связи интегрированы с пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором. Трёхфазная схема ГРТ представлена в [29]. Составлены уравнения цепи в статических и вращающихся координатах, на основе которых получена эквивалентная модель ГРТ. При подключении регуляторов прямой связи к ПИ-регулятору реализована система управления ГРТ во вращающихся координатах $d-q$. Исследования, выполненные на модели гибридной силовой установки в Matlab, показали, что комбинированная система управления ГРТ дает лучший результат.

Схема управления на основе энергетической функции Ляпунова с контурами обратной связи по выходному напряжению для преобразователя ГРТ описана в [30]. Такой подход позволяет преодолеть ограничения существующих схем управления ГРТ, в том числе уменьшить статическую ошибку и улучшить переходную характеристику. В результате объединения контуров обратной связи по выходному напряжению в управляющих переменных предложенный метод обеспечивает стабильную работу и желательную динамику при отслеживании опорного напряжения, а также компенсацию параметрической неопределенности.

Децентрализованная система управления с прогнозированием на основе модели, которая включает ГРТ в систему управления напряжением активной распределительной сети, представлена в [31]. В этой системе каждый ГРТ управляется локальным отказоустойчивым регулятором с прогнозированием, который на основе локальных измерений вычисляет оптимальное значение реактивной мощности. Принцип распределения мощности в ГРТ на основе уравнений динамического баланса предложен в [32]. С использованием дифференциальных уравнений и передаточных функций разработана система управления напряжением в звене постоянного тока с ПИ-регулятором. Показано, что при использовании только ПИ-регулятора не удастся полностью устранить искажения и несимметрию токов. Для решения этой задачи был разработан усовершенствованный регулятор, включающий фильтр нижних частот и три режекторных фильтра. В усовершенствованный контроллер интегрирован контур упреждающей обратной связи по возмущениям. Это обеспечило более высокую производительность при регулировании напряжения и токов в сети, а также позволило устранять искажения и несимметрию.

Метод $d-q$ преобразования для контроля напряжения на зажимах звена постоянного тока разработан в [33]. Общий контроллер регулировал напряжение трансформатора; при этом использовалось векторное управление как один из методов, применяемых в преобразователях

с источником напряжения. Сторона переменного тока преобразователя управлялась с помощью резонансного контроллера. Кроме того, для получения синусоидальной формы напряжения на выходе монтировался LC-фильтр [34].

Разработано большое число алгоритмов управления инвертером АФГ, которые можно объединить в следующие группы: временные, частотные и обучающие [35–37]. Наиболее популярными и простыми в реализации являются алгоритмы во временной области, особенно синхронная система отсчета [38–41] и теория мгновенной мощности [42–45]. Большинство из них для получения лучшего результата требуют тщательной настройки цифрового фильтра нижних частот [46–48]. Применяются также алгоритмические методы фильтрации, основанные на цифровой обработке сигналов. Они используют алгоритмы быстрого преобразования Фурье [49–51].

Цель представленных в статье исследований состояла в разработке системы управления АФГ ГРТ, реализованной, в отличие от известных, на основе каскадного фильтра с вейвлет-преобразованием. Исследования были направлены на анализ эффективности предлагаемой конфигурации ГРТ для активной компенсации гармонических искажений в системе электропитания, питающей высоковольтные и низковольтные электродвигатели. Ниже приведено описание модели исследуемой СЭС и ГРТ с активным фильтром гармоник и предлагаемой системой регулирования, а также результаты моделирования.

Описание модели исследуемой СЭС и ГРТ

Структура СЭС, для которой проводились исследования, представлена на рис. 2. Она получает питание от шин подстанции ЭЭС 110 кВ по двум воздушным линиям через трансформаторы 110/10 кВ мощностью 6300 кВ·А. Основная нагрузка СЭС создается высоковольтными и низковольтными асинхронными двигателями (АД), мощности которых указаны на рис. 2. Низковольтные электродвигатели представлены двумя эквивалентными группами с трансформаторами и ЛЭП. Мощности статических нагрузок также указаны на рис. 2. Особенностью рассматриваемой системы является низкое качество электроэнергии на шинах 110 кВ по критериям несимметрии и несинусоидальности напряжения.

Моделирование выполнялось в среде Matlab с использованием пакетов Simulink и SimPowerSystems. Схема модели представлена на рис. 3. Система (блок System на рис. 3) моделировалась с помощью блока трехфазного источника напряжения с внутренним импедансом

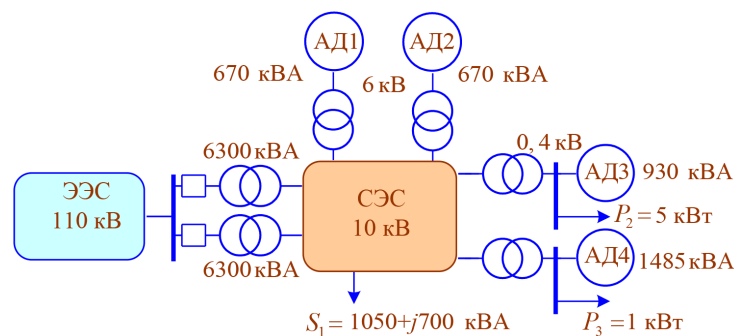


Рис. 2. Структура исследуемой СЭС

Fig. 2. The structure of the power supply system under study

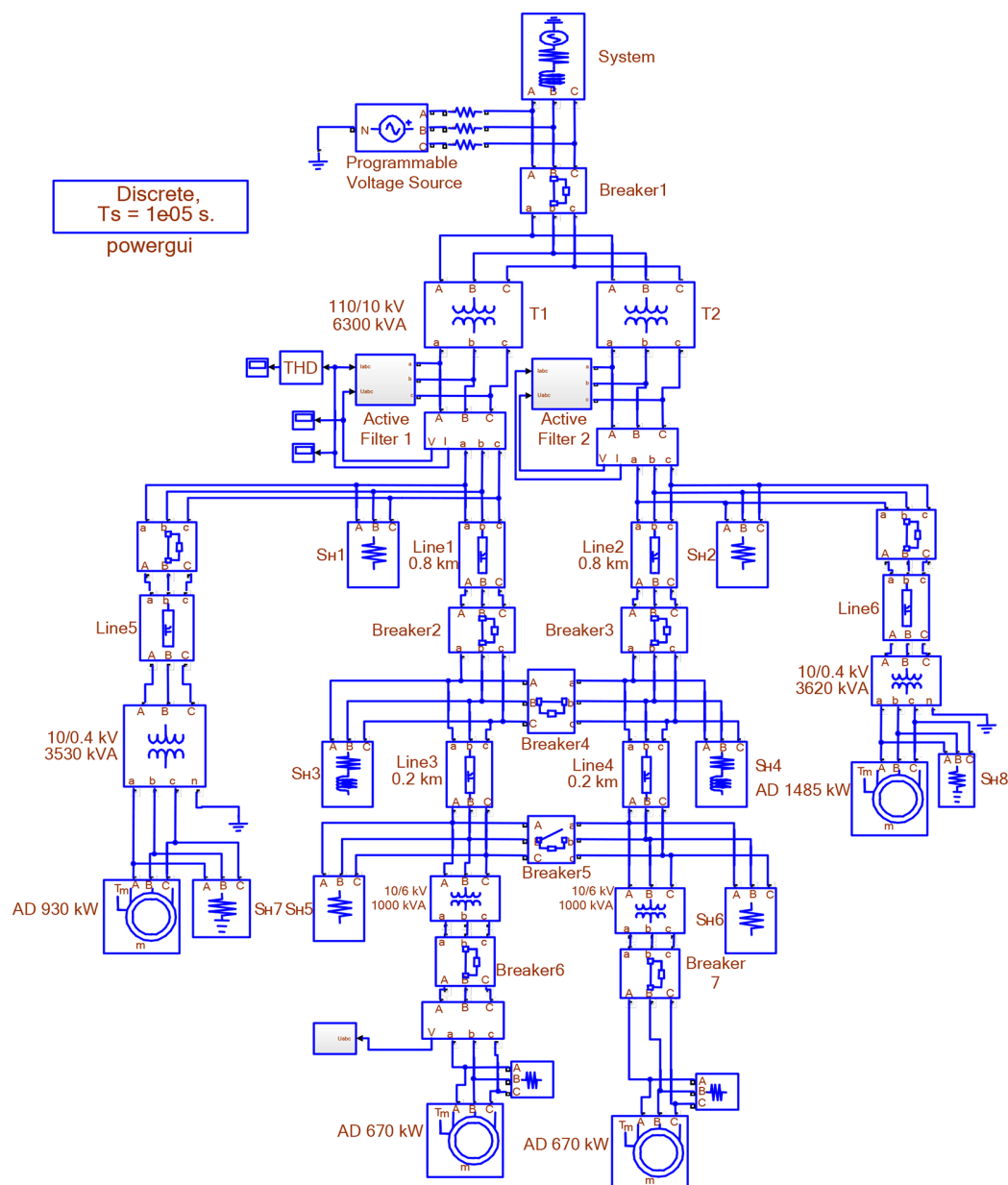


Рис. 3. Схема модели СЭС в MATLAB

Fig. 3. Schematic diagram of the power supply system model in MATLAB

R-L. С помощью этого блока задавалась несимметрия напряжения. Сопротивление R_c питающей ЭЭС было задано равным 65,5 Ом, а индуктивность $L = 0,417$ Гн. Для моделирования искажений синусоидальности питающего напряжения использовался источник гармоник (блок Programmable Voltage Source на рис. 3), который генерировал 3-ю и 5-ю гармоники с амплитудами 0,332 о.е. и 0,174 о.е. соответственно.

В модели учитывались два трансформатора (Т1 и Т2) 110/10 кВ, которые питали две секции шин 10 кВ. Высоковольтные двигатели были подключены через трансформаторы 10/6 кВ

мощностью 1000 кВ·А. В модели СЭС были представлены также ЛЭП 10 кВ, обозначенные на рис. 3 блоками Line с соответствующей длиной. Низковольтные электродвигатели подключались через трансформаторы 10/0,4 кВ. На стороне 10 кВ трансформаторов Т1 и Т2 были установлены активные фильтры гармоник с повышающими трансформаторами 0,4/10 кВ (блоки Active Filter на рис. 3). Развернутая схема АФГ показана на рис. 4. Место установки фильтров выбрано с целью обеспечения требуемого качества электроэнергии в СЭС.

Предлагаемая система управления АФГ ГРТ основана на преобразовании трехфазных величин тока из системы координат $a-b-c$ в $d-q-0$. Для определения частоты преобразования использовался блок фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ, на рис. 4 обозначено как PLL). После преобразования сигнал разделялся на компоненты d и q , которые подавались на блок, реализующий алгоритм вейвлет-фильтрации (Wavelet Filter на рис. 4). Затем они проходили через высокочастотные фильтры (Highpass Filter на рис. 4), формируя сигналы ВГ для компенсации. В результате реализовывалась каскадная фильтрация. В блоке Phase Corrector выполнялась корректировка фазового угла для реализации его разворота на 180 градусов. Далее осуществлялось преобразование сигналов из системы $d-q-0$ в $a-b-c$. Таким образом, формировался эталонный сигнал для генератора ШИМ (блок PWM Generator на рис. 4), который управлял инвертором. В результате инвертор генерировал токи компенсации, которые после LC-фильтра через трансформатор поступали в систему 10 кВ СЭС.

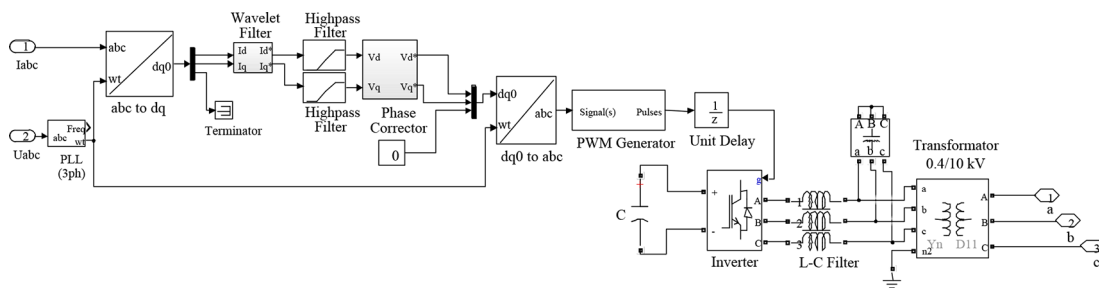


Рис. 4. Схема модели активного фильтра гармоник

Fig. 4. Schematic diagram of the active harmonic filter model

Алгоритм вейвлет-фильтрации реализован в виде пользовательского блока «Matlab Function», выполняющего вычисления на каждом временном шаге моделирования. При этом использовалось стационарное дискретное вейвлет-преобразование (Stationary Wavelet Transform, SWT), которое, в отличие от классического, сохраняло временное разрешение за счет отказа от операции децимации, что критически важно для точного отслеживания динамических процессов в реальном времени. Выбор вейвлета критически влияет на качество фильтрации. Для задач подавления гармонических искажений наиболее часто применяются вейвлеты Добеши (Daubechies) и их модернизации, поскольку они обеспечивают хорошую временно-частотную локализацию сигнала.

Моделирование проводилось в различных режимах работы СЭС. Сравнивались варианты конфигурации ГРТ (пассивные или активные фильтры гармоник) с обычными силовыми

трансформаторами. Кроме того, моделировался режим резкого ухудшения качества электроэнергии со стороны источника 110 кВ.

Результаты имитационного моделирования и основные выводы

Результаты моделирования установившегося режима в виде показателей качества электроэнергии (ПКЭ) в СЭС 10 кВ сведены в табл. 1. Использовались два алгоритма управления АФГ: на основе высокочастотных фильтров и на базе каскадного фильтра с вейвлет-преобразованием. Пассивные фильтры верхних частот были настроены на третью гармонику. Реактивная мощность пассивных LC-фильтров задавалась равной 1000 квар.

Таблица 1. ПКЭ на стороне напряжения 10 кВ силового трансформатора

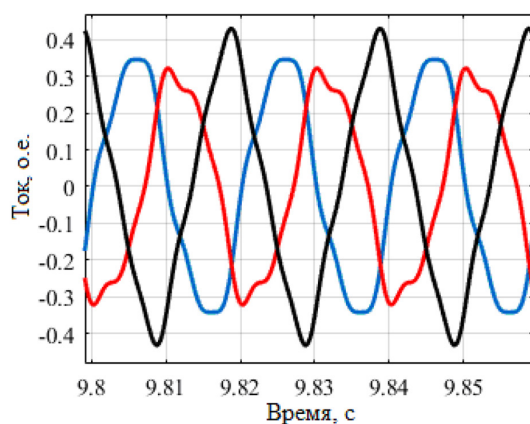
Table 1. Power quality indicators on the voltage side of a 10 kV power transformer

Режимы работы СЭС	Коэффициенты гармоник и коэффициент несимметрии напряжения			
	$K_{UAB}, \%$	$K_{UBC}, \%$	$K_{UCA}, \%$	$K_{2U}, \%$
1. Обычный силовой трансформатор без фильтра гармоник	5,1	5,8	5,4	2,01
2. Гибридный трансформатор с пассивным LC-фильтром гармоник	2,3	2,7	2,5	1,56
3. Гибридный трансформатор с алгоритмом управления активного фильтра гармоник на основе высокочастотного фильтра	2,1	2,5	2,3	1,54
4. Гибридный трансформатор с алгоритмом управления активного фильтра гармоник на основе каскадного фильтра с вейвлет-преобразованием	1,8	1,9	1,6	1,38
Снижение ПКЭ (разница между режимами 1 и 4), %	64,7	67,2	70,4	31,3

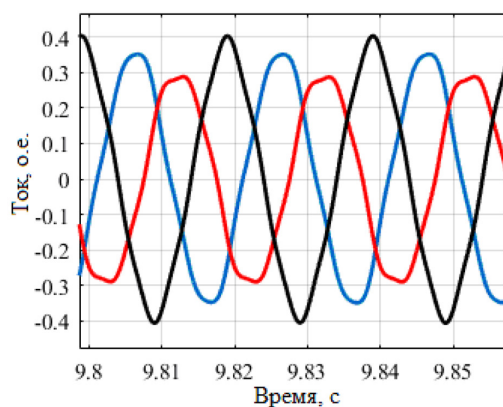
Анализ представленных в табл. 1 ПКЭ позволяет сделать вывод, что предлагаемые гибридные трансформаторы с алгоритмом управления АФГ на основе каскадного фильтра с вейвлет-преобразованием дают возможность существенно улучшить качество электроэнергии в рассматриваемой СЭС: суммарный коэффициент гармоник напряжения снижается в среднем на 67 %; а коэффициент несимметрии напряжения уменьшается на 31 %.

На рис. 5 показана форма кривой тока и величина THD в установившемся режиме СЭС. Из представленных графиков видно, что гибридный трансформатор с предлагаемым алгоритмом управления с вейвлет-преобразованием заметно улучшает синусоидальность кривой тока и создает симметрирующий эффект; при этом величина THD тока снижается в 8,5 раза по сравнению с обычным трансформатором без фильтра гармоник и в 5 раз по сравнению с алгоритмом управления АФГ на основе только высокочастотного фильтра.

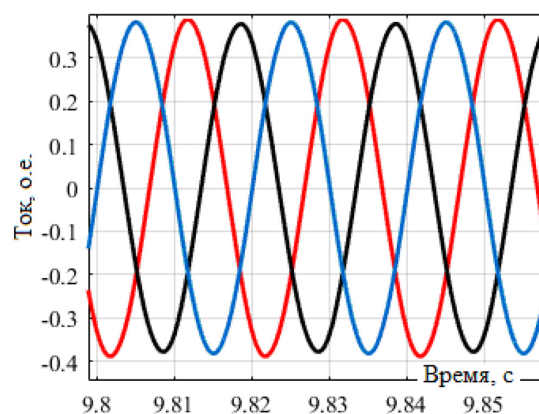
Дополнительно выполнено моделирование режима изменения состава гармоник на шинах 110 кВ ЭЭС. В источник тока ВГ добавлены 39-я и 41-я гармоники с амплитудами 0,36 о.е. и 0,23 о.е. соответственно. Графики изменения величины THD тока на стороне 10 кВ показаны на рис. 6.



(а) трансформаторы без фильтра гармоник, THD=10,6 % / transformers without harmonic filters were used



(б) ГРТ с алгоритмом управления АФГ только на основе высокочастотного фильтра, THD=6,2 % / hybrid transformer with an active harmonic filter control algorithm based only on a high-frequency filter



(в) ГРТ с алгоритмом управления АФГ на основе каскадного фильтра с вейвлет-преобразованием, THD=1,25 % / hybrid transformer with an active harmonic filter control algorithm based on a cascade filter with a wavelet transform

Рис. 5. Временные зависимости тока на стороне 10 кВ трансформатора

Fig. 5. Time dependences of current on the 10 kV side of the transformer

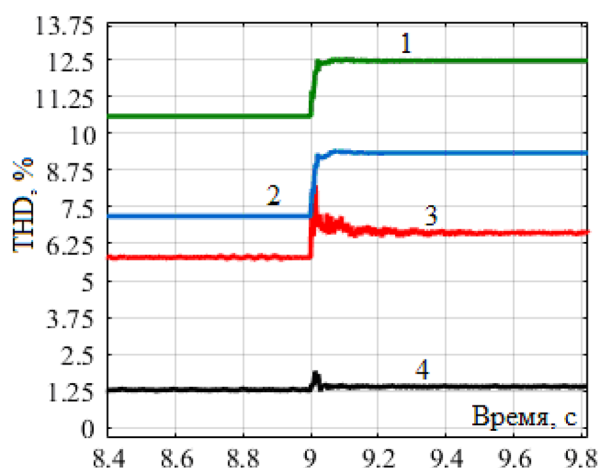


Рис. 6. Графики изменения величины THD тока: 1 – использовались трансформаторы без фильтра гармоник; 2 – ГРТ с пассивным LC-фильтром гармоник; 3 – ГРТ с алгоритмом управления активного фильтра гармоник на основе высокочастотного фильтра; 4 – ГРТ с алгоритмом управления активного фильтра гармоник на основе каскадного фильтра с вейвлет-преобразованием

Fig. 6. Graphs of changes in the value of THD current: 1 – transformers without a harmonic filter were used; 2 – hybrid transformer with a passive LC harmonic filter; 3 – hybrid transformer with an active harmonic filter control algorithm based on a high-pass filter; 4 – hybrid transformer with an active harmonic filter control algorithm based on a cascade filter with a wavelet transform

Заключение

Приведено описание гибридного трансформатора с активным фильтром гармоник, а также результаты моделирования, показывающие эффективность предлагаемой системы регулирования на основе каскадного фильтра с вейвлет-преобразованием. При моделировании получены следующие результаты:

1. Существенно улучшается качество электроэнергии по сравнению с трансформаторами типовой конструкции: суммарный коэффициент гармоник напряжения снижается в среднем на 67 %; коэффициент несимметрии напряжения уменьшается на 31 %. Таким образом, предлагаемый активный фильтр гармоник обладает также симметрирующими свойствами.
2. Величина THD тока снижается в 8,5 раза по сравнению с типовым трансформатором без фильтра гармоник и в 5 раз по сравнению с алгоритмом управления АФГ на основе только высокочастотного фильтра.
3. При изменении состава гармоник в СЭС со стороны источника 110 кВ предлагаемый алгоритм управления АФГ быстро реагирует на эти вариации, полностью компенсируя их.

Список литературы / References

- [1] Brand M. *et al.* OpenEnergyTwin – Open, Interoperable and User-Centered Platform for Sustainable Energy Systems. *ETG Kongress 2025; Voller Energie – heute und morgen*. Kassel, Germany, 2025. Pp. 572–578.
- [2] Sood V.K., Abdelgawad H. Microgrids architectures. *Distributed Energy Resources in Microgrids: Integration, Challenges and Optimization*, 2019. Pp. 1–31.

- [3] Илюшин П.В., Вольный В.С. Обзор структур микросетей низкого напряжения с распределенными источниками энергии. *Релейная защита и автоматизация*, 2023, 1 (50), 68–80 [Ilyushin P. V., Volny V. S. Review of low-voltage microgrid structures with distributed energy sources. *Relay Protection and Automation*, 2023, 1(50), 68–80 (in Russian)]
- [4] Kumar A. Power Quality Issues and Harmonics Performance Analysis for Non-Linear Load in Power Distribution System. *2022 19th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, Mexico City, Mexico, 2022, 1–5, <https://doi.org/10.1109/CCE.56709.2022.9975948>.
- [5] Adefarati T., Bansal R. C. Reliability assessment of distribution system with the integration of renewable distributed generation. *Applied Energy*, 2017, 185(1), 158–171, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.087>.
- [6] Stanciu N., Stănescu D., Postolache P. and Szabo W. Voltage sags and Total Harmonic Distortion monitoring in power systems. A case study, *2013. 8th International symposium on advanced topics in electrical engineering (ATEE)*, Bucharest, Romania, 2013, 1–6, <https://doi.org/10.1109/ATEE.2013.6563440>.
- [7] Bollen M., Shyar H. H., Rönnberg S. Spread of high frequency current emission. *Proceedings of the 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED)*, Stockholm, Sweden, 10–13 June 2013, 1–4.
- [8] Mariscotti A. Power Quality Phenomena, Standards, and Proposed Metrics for DC Grids. *Energies*, 2021, 14, 6453, <https://doi.org/10.3390/en14206453>.
- [9] Monteiro V., Afonso J. L. The Future of Electrical Power Grids: A Direction Rooted in Power Electronics. *Energies*, 2023, 16, 4929, <https://doi.org/10.3390/en16134929>.
- [10] Yanchenko S., Meyer J. Harmonic emission of household devices in presence of typical voltage distortions. *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, Eindhoven, Netherlands, 2015, 1–6, <https://doi.org/10.1109/PTC.2015.7232518>.
- [11] Arranz-Gimon A., Zorita-Lamadrid A., Morinigo-Sotelo D., Duque-Perez O. A Review of Total Harmonic Distortion Factors for the Measurement of Harmonic and Interharmonic Pollution in Modern Power Systems. *Energies*, 2021, 14, 6467, <https://doi.org/10.3390/en14206467>.
- [12] Ghorbani M. J., Mokhtari H. Impact of Harmonics on Power Quality and Losses in Power Distribution Systems. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 2015, 5(1), 166–174, <http://doi.org/10.11591/ijece.v5i1.pp166-174>.
- [13] Das J. C. Passive filters – potentialities and limitations. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2004, 40(1), 232–241, <https://doi.org/10.1109/TIA.2003.821666>.
- [14] Skamyin A., Shklyarskiy Y., Gurevich I. Influence of Background Voltage Distortion on Operation of Passive Harmonic Compensation Devices. *Energies*, 2024, 17, 1342, <https://doi.org/10.3390/en17061342>.
- [15] Singh B., Al-Haddad K., Chandra A. A review of active filters for power quality improvement, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1999, 46(5), 960–971, <https://doi.org/10.1109/41.793345>.
- [16] Bhagyashri R. G., Bodkhe N. A. Active Power Filters for Power Quality Improvement. *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 2021, 8, a563–a570.

- [17] Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Romanova V. V., Kizhin V. V. Simulation Modeling of the Active Harmonic Filter Control System of a Hybrid Transformer when Connecting Electric-Vehicle Charging Stations. *Technical Physics Letters*, 2025, 51(5), 191–197, https://doi.org/10.1134/S_1063785025700269.
- [18] Haj-Maharsi M. Y., Tang L., Gutierrez R., Bala S. *Hybrid distribution transformer with ac & dc power capabilities*, US Patent US 2010/0201338 A1, ABB Research Ltd, Aug. 12, 2010.
- [19] Bala S., Das D., Aeloiza E., Maitra A. and Rajagopalan S. Hybrid distribution transformer: Concept development and field demonstration. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Raleigh, NC, USA, 2012, 4061–4068, <https://doi.org/10.1109/ECCE.2012.6342271>.
- [20] Aeloiza E. C., Enjeti P. N., Moran L. A. and Pitel I. Next generation distribution transformer: to address power quality for critical loads. *IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist, 2003. PESC '03.*, Acapulco, Mexico, 2003, 3, 1266–1271, <https://doi.org/10.1109/PESC.2003.1216771>.
- [21] Carreno A., Perez M., Baier C., Huang A., Rajendran S., Malinowski M. Configurations, Power Topologies and Applications of Hybrid Distribution Transformers. *Energies*, 2021, 14, 1215, <https://doi.org/10.3390/en14051215>.
- [22] Strzelecki R., Matelski W., Tomasov V. Hybrid stepless distribution transformer with four-quadrant AC/DC/AC converter at low voltage side – Simulation tests. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2018, 94, 121–127, <https://doi.org/10.15199/48.2018.06.23>.
- [23] Sasaki H., Machida T. A New Method to Eliminate AC Harmonic Currents by Magnetic Flux Compensation-Considerations on Basic Design. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, 1971, PAS-90, 2009–2019.
- [24] Gyugyi L., Strycula E. Active AC Power Filters. *Proceedings of the IEEE/IAS Annual Meeting*, Orlando, FL, USA, 31 October 1976, pp. 529–535.
- [25] Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 1984, IA-20, 625–630.
- [26] Montero M.I. M., Cadaval E.R. and Gonzalez F.B. Comparison of Control Strategies for Shunt Active Power Filters in Three-Phase Four-Wire Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, 22(1), 229–236, <https://doi.org/10.1109/TPEL.2006.886616>.
- [27] Розанов Ю. К., Лепанов М. Г., Киселев М. Г., Крюков К. В. Устройство регулирования качества электрической энергии для трехфазных распределительных систем электроснабжения. *Управление качеством электрической энергии: Сб. трудов Междунар. науч.-практ. конф.*, Москва, 26–28 ноября 2014, 115–122 [Rozanov Yu.K., Lapanov M.G., Kiselev M.G., Kryukov K. V. Device for regulating the quality of electrical energy for three-phase power supply distribution systems. *Upravleniye kachestvom elektricheskoy energii: Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, Moscow, November 26–28, 2014, 115–122 (in Russian)]
- [28] Liu Y. *et al.* Compound Control System of Hybrid Distribution Transformer. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 56(6), 6360–6373, <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3014058>.
- [29] Liu Y., Liang D., Liang Y., Zhang M. and Chen Q. Design and Analysis of the Compounded Control System of Hybrid Distribution Transformer. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Portland, OR, USA, 2018, 3664–3668, <https://doi.org/10.1109/ECCE.2018.8558229>.

- [30] Fereydouni M., Rokrok E. Controlling hybrid transformers by Lyapunov method for application in smart distribution network. *Electr. Eng.*, 2025, 107, 12821–12831, <https://doi.org/10.1007/s00202-025-03180-x>.
- [31] Kou P., Liang D., Gao R., Liu Y. and Gao L. Decentralized Model Predictive Control of Hybrid Distribution Transformers for Voltage Regulation in Active Distribution Networks. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(4), 2189–2200, <https://doi.org/10.1109/TSTE.2019.2952171>.
- [32] Liu Y. *et al.* Power Flow Analysis and DC-link Voltage Control of Hybrid Distribution Transformer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(11), 12579–12595, <https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3077452>.
- [33] Radi M., Darwish M., Taylor G., Pisica I. Control Configurations for Reactive Power Compensation at the Secondary Side of the Low Voltage Substation by Using Hybrid Transformer. *Energies*, 2021, 14, 620. <https://doi.org/10.3390/en14030620>.
- [34] Radi M.A., Darwish M., Alqarni M. Voltage Regulation Considerations for the Design of Hybrid Distribution Transformers. *Proceedings of the 2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Cluj-Napoca, Romania, 2–5 September 2014, 1–6.
- [35] Hoon Y., Radzi M. M., Hassan M., Mailah N. Control algorithms of shunt active power filter for harmonics mitigation: A review, *Energies*, 2017, vol. 10, no. 12, p. 2038.
- [36] Green T.C. and Marks J.H. Control techniques for active power filters, *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, 2005, 152(2), 369–381.
- [37] Bhattacharya A., Chakraborty C., Bhattacharya S. Shunt compensation–Reviewing traditional methods of reference current generation. *IEEE Ind. Electron. Mag.*, 2009, 3(3), 38–49.
- [38] Al-Ogaili A. S., Ramasamy A., Hoon Y., Verayiah R., Marsadek M., Juhana T., Rahmat N.A. Time-domain harmonic extraction algorithms for three-level inverter-based shunt active power filter under steady-state and dynamic-state conditions–An evaluation study. *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, 2020, 10(6), 5609–5620.
- [39] Suul J.A., Ljøkelsoy K., Midsund T., Undeland T. Synchronous reference frame hysteresis current control for grid converter applications. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2011, 47(5), 2183–2194.
- [40] Monfared M., Golestan S., Guerrero J.M. A new synchronous reference frame-based method for single-phase shunt active power filters. *J. Power Electron.*, 2013, 13(4), 692–700.
- [41] Hoon Y., Zainuri M. A. A. M., Al-Ogaili A. S., Al-Masri A. N., Teh J. Active Power Filtering Under Unbalanced and Distorted Grid Conditions Using Modular Fundamental Element Detection Technique. *IEEE Access*, 2021, 9, 107502–107518, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3101238>.
- [42] Eskandarian N., Beromi Y.A., Farhangi S. Improvement of dynamic behavior of shunt active power filter using fuzzy instantaneous power theory. *J. Power Electron.*, 2014, 14(6), 1303–1313.
- [43] Djazia K., Krim F., Chaoui A., Sarra M. Active Power Filtering Using the ZDPC Method under Unbalanced and Distorted Grid Voltage Conditions. *Energies*, 2015, 8, 1584–1605, <https://doi.org/10.3390/en8031584>.
- [44] Hoon Y., Radzi M. M., Hassan M., Mailah N. A dual-function instantaneous power theory for operation of three-level neutral-point-clamped inverter-based shunt active power filter. *Energies*, 2018, 11(6), 1592.
- [45] Imam A.A., Kumar R. S, Al-Turki Y.A. Modeling and simulation of a PI controlled shunt active power filter for power quality enhancement based on P-Q theory. *Electronics*, 2020, 9(4), 637.

- [46] Anzari M., Chandran R., ArunKumar R. Single-phase shunt active power filter using indirect control method. *Adv. Electron. Electr. Eng.*, 2013, 3(1), 81–90.
- [47] Vijayasree J., Vijayakrishna B., Babu Y.R. Implementation of SRF based multilevel shunt active filter for harmonic control. *Int. J. Eng. Res. Develop.*, 2012, 3(8), 16–20.
- [48] Jain N., Gupta A. Comparison between two compensation current control methods of shunt active power filter. *Int. J. Eng. Res. Gen. Sci.*, 2014, 2(5), 603–615.
- [49] Sujitjom S., Areerak K.L., Kulworawanichpong T. The DQ axis with Fourier (DQF) method for harmonic identification. *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2007, 22, 737–739.
- [50] Jajarmi H. R. I., Mohamed A., Shareef H., and Subiyanto, A new method for calculating the reference current of shunt active power filters based on recursive discrete Fourier transform. *Int. Rev. Model. Simul.*, 2012, 5(4), 1439–1446.
- [51] Dey P., Mekhilef S. Current harmonics compensation with three-phase four-wire shunt hybrid active power filter based on modified D-Q theory. *IET Power Electron.*, 2015, 8, 2265–2280.

Theoretical and Applied Heat Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: BFCNQO

УДК 621.65–82

**Development of Experimental Techniques
for Research Softplc Platforms
and Control Algorithms for a Heating Station**

Nikolay K. Borodin and Vladimir A. Kulagin*

*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 16.07.2026, received in revised form 20.08.2026, accepted 21.08.2026

Abstract. A laboratory hydraulic test bench has been developed for experimental debugging of a hardware-independent SoftPLC platform and the automatic control algorithms implemented within it. The bench functionally reproduces working-fluid distribution processes in a heating substation and makes it possible to study hydraulic inertia, interaction between control loops, nonlinear behavior of control valves and the pumping unit, and system response to external disturbances. Propylene glycol is used as the working fluid. The bench comprises a storage tank, a variable-frequency-driven pump, three motor-operated ball valves, transparent supply and return columns, two pressure transmitters, local pressure gauges, automatic air vents, and a unit simulating the hydraulic resistance of a consumer. The SoftPLC runs on an industrial panel computer and communicates with the remote input/output module via Modbus TCP; the pump frequency converter is connected through a Modbus RTU-to-Modbus TCP gateway. The paper describes the bench design and operating principle, the hardware and software architecture, a conventional PID controller, an adaptive PID controller, and a reinforcement-learning-based neural controller. A program of 42 basic experimental scenarios has been developed. It covers single-loop and multivariable control configurations, three controller types, and operation with and without an imposed disturbance. Requirements for repeatable comparative testing and a set of performance indicators are proposed for subsequent assessment of control accuracy, transient response quality, control-signal smoothness, actuator loading, and energy consumption.

Keywords: SoftPLC, programmable logic controller, laboratory test bench, heating substation, hydraulic loop, PID controller, adaptive controller, neural controller, reinforcement learning, Modbus TCP, experimental repeatability.

Citation: Borodin N. K., Kulagin V. A. Development of Experimental Techniques for Research Softplc Platforms and Control Algorithms for a Heating Station. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(6), 719–738. EDN: BFCNQO



© 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: v.a.kulagin@mail.ru

Развитие техники эксперимента исследования SoftPLC-платформы и алгоритмов регулирования теплового пункта

Н. К. Бородин, В. А. Кулагин
*Сибирский федеральный университет
Красноярск, Российская Федерация*

Аннотация. Для экспериментальной отладки аппаратно-независимой SoftPLC-платформы и реализуемых в ее составе алгоритмов автоматического регулирования разработан лабораторный гидравлический испытательный стенд, функционально воспроизводящий процессы распределения рабочей жидкости в тепловом пункте. Стенд позволяет исследовать инерционность гидравлического объекта, взаимное влияние контуров, нелинейность регулирующих органов и насосного агрегата, а также реакцию системы на внешние возмущения. В качестве рабочей жидкости используется пропиленгликоль. В состав стенда входят накопительная емкость, насос с частотным преобразователем, три регулирующих шаровых крана с электроприводами, подающая и обратная прозрачные колонны, два преобразователя давления, ручные контрольные манометры, автоматические воздухоотводчики и узел, имитирующий гидравлическое сопротивление потребителя. SoftPLC функционирует на промышленном панельном компьютере и взаимодействует с модулем ввода-вывода по протоколу Modbus TCP; частотный преобразователь насоса подключен через шлюз Modbus RTU – Modbus TCP. Описаны конструкция и принцип действия стенда, аппаратно-программная архитектура, классический ПИД-регулятор, адаптивный ПИД-регулятор и нейросетевой регулятор с обучением с подкреплением. Сформирована программа из 42 базовых экспериментальных сценариев, предусматривающая одиночные и многосвязные контуры управления, три типа регуляторов и два режима воздействия возмущения. Предложены требования к обеспечению повторяемости сравнительных испытаний и набор показателей для последующей оценки точности, качества переходных процессов, плавности управляющих воздействий и энергопотребления.

Ключевые слова: SoftPLC, программируемый логический контроллер, испытательный стенд, тепловой пункт, гидравлический контур, ПИД-регулятор, адаптивный регулятор, нейросетевой регулятор, обучение с подкреплением, Modbus TCP, повторяемость эксперимента.

Цитирование: Бородин Н. К. Развитие техники эксперимента исследования SoftPLC-платформы и алгоритмов регулирования теплового пункта / Н. К. Бородин, В. А. Кулагин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(6). С. 719–738. EDN: BFCNQO

Введение

Автоматизация тепловых пунктов относится к задачам, в которых качество регулирования определяется не только выбранным законом управления, но и способом его программной реализации, характеристиками вычислительной платформы, организацией обмена с полевыми устройствами и возможностью корректно учитывать взаимное влияние технологических контуров [1, 2, 5]. В реальном объекте экспериментальная проверка новых алгоритмов затруднена требованиями непрерывности теплоснабжения, изменчивостью нагрузки потребителей и ограниченной воспроизводимостью внешних воздействий. Отладка непосредственно на действующем тепловом пункте повышает риск нарушения технологического режима и не позволяет многократно воспроизводить одинаковые исходные условия для сопоставления разных регуляторов.

Одним из направлений развития систем автоматизации является перенос функций программируемого логического контроллера в программную среду SoftPLC, работающую на промышленной вычислительной платформе общего назначения [3, 4]. Такой подход создает техническую возможность объединить в одном программном процессе стандартные логические функции, обмен с распределенным вводом-выводом, архивирование, человеко-машинный интерфейс и вычислительно более сложные алгоритмы управления. Вместе с тем сам факт программной реализации контроллера не доказывает преимущества SoftPLC перед аппаратным ПЛК. Для обоснованной оценки необходимы физический объект, формализованная программа испытаний, одинаковые условия для сравниваемых алгоритмов и регистрация как технологических, так и платформенных показателей.

Для решения этой задачи разработан лабораторный стенд, воспроизводящий основные гидравлические взаимосвязи, характерные для центрального теплового пункта либо узла регулирования и распределения теплоносителя. Стенд предназначен для безопасной отладки SoftPLC, исполнительных механизмов и алгоритмов управления, а также для формирования повторяемых экспериментальных режимов. Его конструкция позволяет исследовать инерционность изменения давления и высоты столба жидкости, взаимное влияние подающего и обратного участков, нелинейность характеристик шаровых кранов и насосного агрегата, а также реакцию системы на искусственно создаваемые гидравлические возмущения.

Целью работы является разработка лабораторного гидравлического стенда и программы испытаний для экспериментальной проверки работоспособности аппаратно-независимой SoftPLC-платформы и сравнительного исследования классического, адаптивного и нейросетевого алгоритмов регулирования в условиях нелинейности, взаимного влияния контуров и внешних возмущений.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- 1) формирование замкнутого гидравлического контура, функционально имитирующего подачу рабочей жидкости к потребителю и ее возврат;
- 2) оснащение стенда управляемыми исполнительными механизмами и средствами измерения, пригодными для подключения к SoftPLC;
- 3) организация обмена данными между вычислительным устройством, модулем ввода-вывода и частотным преобразователем;
- 4) реализация в единой программной среде классического ПИД-регулятора, адаптивного ПИД-регулятора и нейросетевого регулятора;
- 5) формирование программы одиночных и многосвязных экспериментальных режимов;
- 6) определение условий повторяемости испытаний и показателей последующего количественного сравнения регуляторов.

1. Объект исследования и границы физического моделирования

Объектом исследования является автоматизированный гидравлический контур, функционально воспроизводящий работу узла подачи и возврата рабочей жидкости в тепловом пункте. Стенд не является уменьшенной копией конкретного промышленного ЦТП и не предназначен для прямого переноса его геометрических и теплотехнических параметров на реальный объект. Он представляет собой физическую функциональную модель, в которой сохранены

необходимые для отладки управления причинно-следственные связи: изменение производительности насоса и проходного сечения регулирующих органов влияет на давления и высоты столбов жидкости, изменение одного исполнительного механизма воздействует на несколько измеряемых координат, а дополнительный регулирующий орган позволяет задавать внешнее гидравлическое возмущение.

В качестве рабочей жидкости используется пропиленгликоль. Жидкость циркулирует в замкнутой системе и после прохождения гидравлического тракта возвращается в накопительную емкость. Выбор замкнутой схемы исключает постоянный расход рабочей жидкости и позволяет многократно воспроизводить режимы на одном и том же объекте. При этом перед контрольной серией испытаний должны быть зафиксированы концентрация и плотность применяемого пропиленгликоля, поскольку эти параметры необходимы для однозначного преобразования давления в высоту жидкостного столба и для сопоставления опытов, выполненных в разное время.

На стенде воспроизводятся только гидравлические процессы. В его текущем составе отсутствуют нагреватель, управляемый тепловой источник и датчики температуры, поэтому полученные на нем данные не характеризуют тепловую инерцию здания, теплообменника или системы отопления. Термины «тепловой пункт» и «потребитель» далее относятся к функциональному назначению моделируемого гидравлического узла, а не к воспроизведению теплового баланса.

Экспериментальное исследование предусматривает реализацию в единой SoftPLC-среде как классических алгоритмов регулирования, так и разработанных нейросетевых регуляторов. Их испытания на одном физическом объекте при одинаковых конфигурациях стенда и внешних воздействиях позволяют корректно сопоставить качество управления. Таким образом, предметом сравнения являются алгоритмы регулирования, а SoftPLC выступает единой платформой для их реализации и экспериментальной проверки.

2. Конструкция и принцип действия испытательного стенда

2.1. Гидравлическая схема

Функциональная схема стенда представлена на рис. 1, общий вид установки спереди и сбоку – на рис. 2. Все основные элементы размещены на пространственной металлической раме (рис. 3). Компоновка обеспечивает визуальный контроль движения рабочей жидкости, доступ к исполнительным механизмам и возможность повторного запуска установки из одинакового исходного состояния.

Накопительная емкость выполняет функцию гидравлического аккумулятора. Из нее рабочая жидкость забирается насосом ПНП и подается в участок T11, соответствующий подающей линии к условному потребителю. После прохождения верхнего узла жидкость поступает в участок T21, соответствующий обратной линии, и затем возвращается в накопительную емкость. Участки T11 и T21 выполнены в виде высоких прозрачных колонн, благодаря чему изменение гидравлического режима можно наблюдать непосредственно по положению границы жидкостного столба.

Гидравлическое сопротивление условного потребителя создается частично закрытым шаровым краном, установленным в верхней части тракта. Этот элемент не участвует в автома-

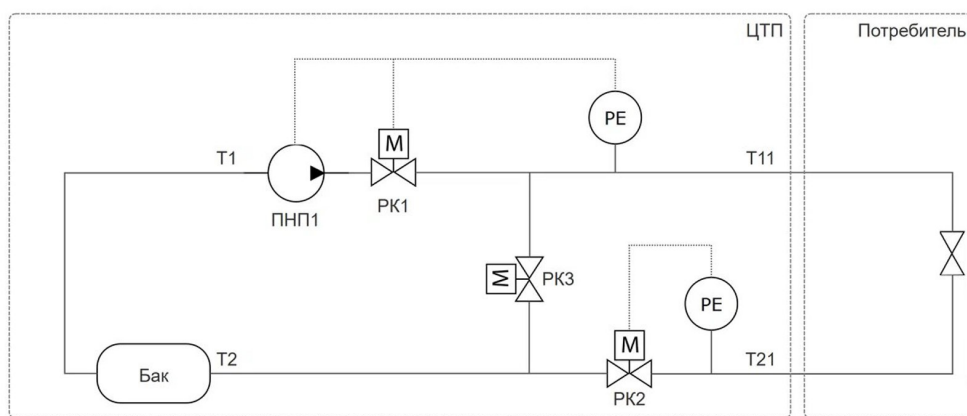


Рис. 1. Функциональная схема испытательного стенда

Fig. 1. Functional diagram of the test rig



Рис. 2. Общий вид испытательного стенда: а – спереди; б – сбоку

Fig. 2. General view of the test rig: a – front; b – side

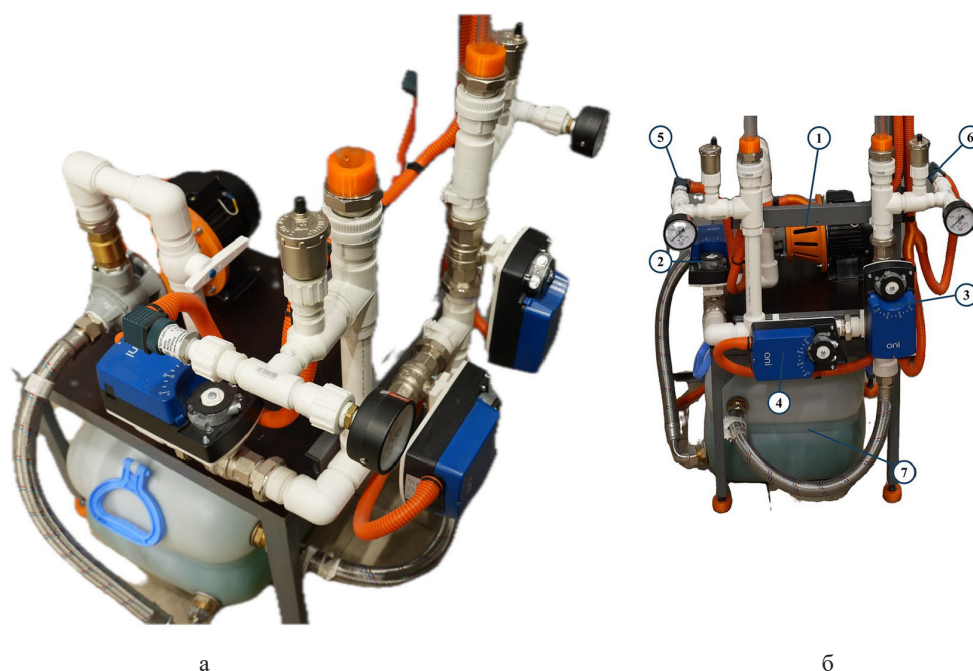


Рис. 3. Исполнительные механизмы и ключевые узлы стенда: а – вид гидравлической части; б – расположение элементов; 1 – ПНП1; 2 – РК1; 3 – РК2; 4 – РК3; 5 – PT_T11; 6 – PT_T21; 7 – накопительная емкость

Fig. 3. Actuators and key components of the rig: а – view of the hydraulic section; б – arrangement of components; 1 – PNP1; 2 – RK1; 3 – RK2; 4 – RK3; 5 – PT_T11; 6 – PT_T21; 7 – storage tank

тическом регулировании в рамках основной программы испытаний и задает постоянное сопротивление, на фоне которого изменяются управляющие и возмущающие воздействия. Узел условного потребителя показан на рис. 4.

Непосредственно после насоса установлен регулирующий кран РК1. На обратном участке размещен регулирующий кран РК2. Третий регулирующий кран РК3 установлен горизонтально в байпасной линии и применяется для имитации внешнего гидравлического возмущения. Изменение его положения влияет на распределение потока и давление в основном тракте, что позволяет воспроизводить последствия неравномерного потребления и колебаний располагаемого давления.

В верхних точках гидравлического контура установлены автоматические воздухоотводчики, упрощающие заполнение и запуск стенда. Местные показывающие манометры используются для визуального контроля и независимой оперативной проверки сигналов электронных преобразователей давления. Они не заменяют архивируемые измерительные каналы SoftPLC. Основные функциональные элементы стенда приведены в табл. 1.

2.2. Исполнительные механизмы

Насос ПНП1 создает циркуляцию рабочей жидкости и обеспечивает изменение напора в системе. Управляющее воздействие на насос формируется SoftPLC и передается частотному преобразователю ZUKED HE 200. Изменение частоты вращения позволяет использовать насос



Рис. 4. Узел, имитирующий гидравлическое сопротивление потребителя

Fig. 4. Unit simulating consumer hydraulic resistance

Таблица 1. Состав и назначение основных элементов испытательного стенда

Table 1. Composition and purpose of the main test rig components

Обозначение	Элемент	Модель или исполнение	Назначение
—	Накопительная емкость	Модель не установлена	Хранение рабочего объема пропиленгликоля, прием обратного потока
ПНП1	Насосный агрегат	Насос ВИХРЬ	Подача рабочей жидкости и создание напора
—	Частотный преобразователь	ZUKED HE 200	Управление насосом ПНП1
РК1	Регулирующий шаровой кран с электроприводом	ONI ODA-24-M-230-N-A	Воздействие на подающий участок после насоса
РК2	Регулирующий шаровой кран с электроприводом	ONI ODA-24-M-230-N-A	Воздействие на обратный участок
РК3	Регулирующий шаровой кран с электроприводом	ONI ODA-24-M-230-N-A	Формирование возмущения в байпасной линии
РТ_Т11	Преобразователь давления	ПД100-ДИ0,1–371–0,5	Измерение давления на подающем участке Т11
РТ_Т21	Преобразователь давления	ПД100-ДИ0,1–371–0,5	Измерение давления на обратном участке Т21
Т11	Прозрачная вертикальная колонна	Индивидуальное исполнение	Визуализация состояния подающего участка
Т21	Прозрачная вертикальная колонна	Индивидуальное исполнение	Визуализация состояния обратного участка

Таблица 1. Продолжение

Table 1. Continued

Обозначение	Элемент	Модель или исполнение	Назначение
—	Шаровой кран условного потребителя	Ручной, частично закрытый	Создание постоянного гидравлического сопротивления потребителя
—	Автоматические воздухоотводчики	Модель не установлена	Удаление воздуха при заполнении и запуске
—	Показывающие манометры	Росма	Местный визуальный контроль давления

как регулирующий орган в сценариях, где управляемой координатой являются высота жидкостного столба либо давление.

Краны РК1–РК3 оснащены электроприводами ONI ODA-24-M-230-N-A. Для каждого привода используется аналоговый сигнал задания 4–20 мА и аналоговый сигнал обратной связи 4–20 мА, характеризующий фактическое положение регулирующего органа. Наличие позиционной обратной связи позволяет анализировать не только технологический результат регулирования, но и характер движения привода: суммарный ход, количество изменений направления и интенсивность мелких корректирующих перемещений.

Функции кранов различаются. РК1 является регулирующим органом подающего участка и расположен непосредственно после насоса. РК2 воздействует на режим обратной линии. РК3 не включается в основную пару «регулятор – исполнительный механизм», когда используется как генератор внешнего возмущения. При отсутствии возмущения его положение остается постоянным и задается вручную для конкретного сценария. При испытании с возмущением положение РК3 изменяется по заранее подготовленной последовательности.

Расположение насосного агрегата и трех регулирующих кранов показано на рис. 3. На выносках должны быть указаны ПНП1, РК1, РК2 и РК3; на общих видах дополнительно обозначаются накопительная емкость и преобразователи РТ_Т11 и РТ_Т21.

2.3. Измерительные каналы

Давление в подающем и обратном участках измеряется преобразователями РТ_Т11 и РТ_Т21 типа ПД100-ДИ0,1–371–0,5 [6]. Диапазон измерения каждого преобразователя составляет от 0 до 0,1 МПа, предел основной приведенной погрешности – 0,5 %, выходной сигнал – 4–20 мА. Преобразователи имеют керамическую измерительную мембрану, присоединение G1/2 и электрический разъем DIN 43650. РТ_Т11 установлен на ближнем подающем трубопроводе, РТ_Т21 – на дальнем обратном трубопроводе.

В экспериментах по регулированию давления сигналы РТ_Т11 и РТ_Т21 представляются в мегапаскалях. Для режимов, связанных с высотой жидкостного столба, измерительный сигнал масштабируется в сантиметры. В матрице испытаний соответствующая регулируемая величина обозначена L. До начала контрольной сравнительной серии необходимо однозначно зафиксировать, к какому измерительному каналу относится L и по какой зависимости выполняется пересчет давления в высоту столба с учетом плотности фактически используемой

жидкости. Без этой фиксации результаты, полученные в разные дни или при разном составе пропиленгликоля, нельзя считать метрологически сопоставимыми.

Местные манометры служат визуальными дублирующими приборами. Их показания могут использоваться при подготовке стенда и для обнаружения грубых несоответствий, однако количественная обработка должна выполняться по синхронно архивируемым цифровым данным измерительных каналов.

3. Аппаратно-программная система управления

3.1. Вычислительная платформа и распределенный ввод-вывод

SoftPLC функционирует на промышленном сенсорном панельном компьютере Faismars. Используемая конфигурация включает 12-дюймовый экран с разрешением 1280×720 пикселей, процессор класса 1335U, 16 Гбайт оперативной памяти, твердотельный накопитель объемом 256 Гбайт и интерфейс RS-485.

Подключение аналоговых и дискретных сигналов организовано через модуль удаленного ввода-вывода CWT-MB 308P [7]. Модуль содержит восемь аналоговых входов, четыре аналоговых выхода, шестнадцать дискретных входов и шесть дискретных выходов. Обмен между SoftPLC и модулем выполняется по сети Ethernet с использованием протокола Modbus TCP. Аналоговые входы используются для приема сигналов преобразователей давления и обратной связи приводов кранов; аналоговые выходы – для формирования управляющих сигналов исполнительным механизмам. Конкретная таблица соответствия физических клемм, Modbus-регистров и программных тегов должна храниться вместе с конфигурацией опыта.

Частотный преобразователь ZUKED HE 200 взаимодействует с SoftPLC через преобразователь интерфейсов USR-DR 134, выполняющий шлюзование между Modbus RTU и Modbus TCP [8]. Таким образом, вычислительная платформа использует единый Ethernet-сегмент для обмена с модулем ввода-вывода и для доступа к устройству, физически работающему по последовательному интерфейсу.

Логическая структура информационных связей имеет следующий вид:

- 1) преобразователи PT_T11 и PT_T21, а также сигналы положения PK1–PK3 поступают на аналоговые входы CWT-MB 308P;
- 2) команды приводам PK1–PK3 формируются SoftPLC и выдаются через аналоговые выходы CWT-MB 308P;
- 3) обмен SoftPLC с CWT-MB 308P осуществляется по Modbus TCP;
- 4) команда и доступная телеметрия частотного преобразователя передаются через USR-DR 134;
- 5) алгоритмы управления, нейросетевая модель, визуализация и архивирование выполняются на панельном компьютере.

Аппаратная часть шкафа управления показана на рис. 5, структурная схема информационного обмена – на рис. 6.

3.2. Организация цикла SoftPLC

Работа SoftPLC организована циклически. В каждом цикле выполняются прием и масштабирование входных данных, обновление состояния программных тегов, расчет выбранных алгоритмов управления, ограничение и выдача команд исполнительным механизмам, обнов-

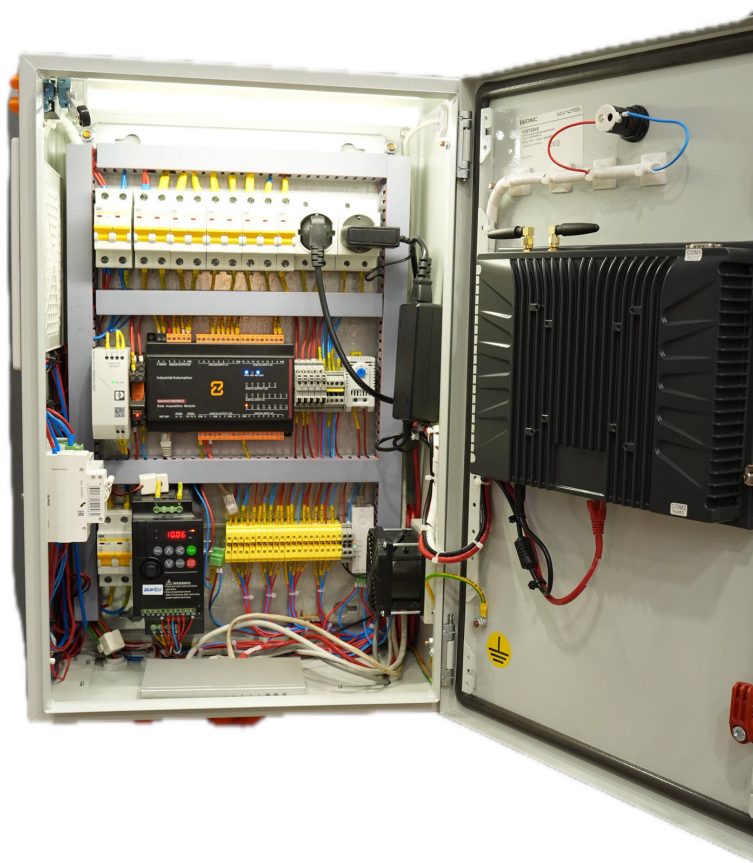


Рис. 5. Аппаратная часть шкафа управления стендом

Fig. 5. Hardware of the rig control cabinet

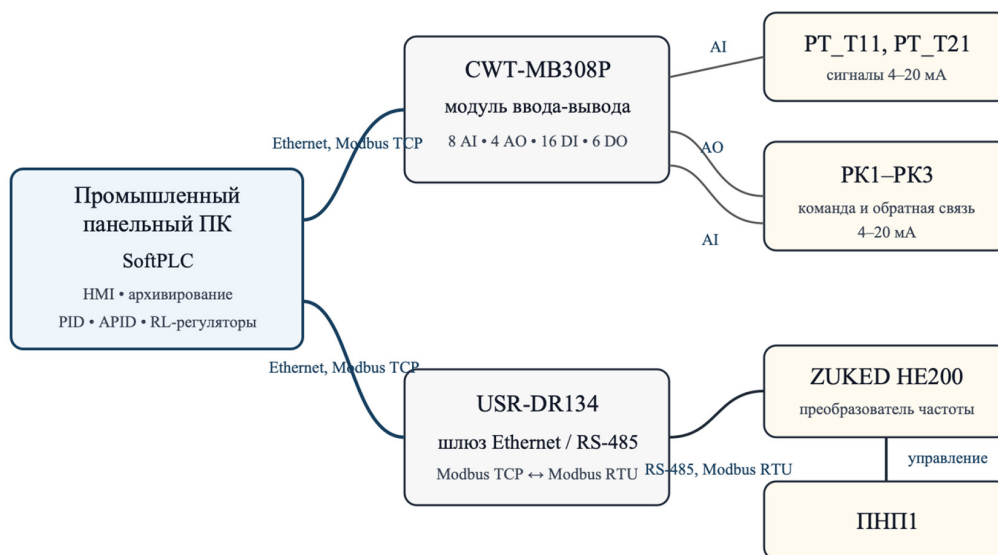


Рис. 6. Структурная схема аппаратно-программного комплекса

Fig. 6. Structural diagram of the hardware and software system

ление человеко-машинного интерфейса и подготовка данных к архивированию. Фактическая длительность цикла составляет десятки миллисекунд.

Указанное значение характеризует наблюдаемый порядок длительности цикла, но не заменяет его количественной оценки. Для подтверждения пригодности платформы к задачам регулирования в контрольных испытаниях должны регистрироваться временные метки начала либо завершения циклов. Это позволит определить средний период, разброс, предельное значение и джиттер цикла, а также выявить возможную связь редких задержек с сетевым обменом, записью архива или работой нейросетевого алгоритма.

Нейросетевая модель выполняется внутри процесса SoftPLC. Благодаря этому для расчета управления не требуется отдельный внешний вычислитель, а данные технологических тегов передаются модели без дополнительного межпроцессного сетевого канала. При сравнении алгоритмов версия SoftPLC, версия модели, конфигурация тегов и период выполнения должны сохраняться неизменными в пределах одной контрольной серии.

Человеко-машинный интерфейс обеспечивает отображение текущих значений, задание режимов и уставок, ручное управление, контроль состояния оборудования и архивирование данных. Для воспроизводимости опыта вместе с технологическими рядами должны записываться идентификатор сценария, тип и версия регулятора, уставка, команды и обратная связь исполнительных механизмов, состояние генератора возмущения, режим «ручной/автоматический», диагностические признаки обмена и временные метки.

4. Реализуемые алгоритмы регулирования

4.1. Общая организация регуляторов

В SoftPLC предусмотрены три варианта алгоритма: классический ПИД-регулятор (PID), адаптивный ПИД-регулятор (APID) и нейросетевой регулятор (AI). Во всех вариантах объект управления, измерительные каналы, исполнительные механизмы, цикл опроса и способ выдачи команд остаются одинаковыми. Такое построение позволяет связывать различия в поведении стенда с алгоритмом управления при условии, что остальные параметры опыта зафиксированы.

Для каждого исполнительного механизма используется отдельный экземпляр регулятора. В многосвязных режимах каждый регулятор получает доступ ко всей архивируемой телеметрии стенда, но формирует команду только одному назначенному механизму. Такой принцип сохраняет распределение ответственности между каналами управления и одновременно позволяет учитывать межконтурные связи.

При сопоставлении регуляторов должны применяться одинаковые ограничения управляющего сигнала, диапазоны допустимого положения кранов, условия запуска и защитные блокировки. Настройка одного алгоритма не должна выполняться по данным контрольного прогона другого алгоритма после ознакомления с его результатом, если такая возможность заранее не предусмотрена единым протоколом.

4.2. Классический ПИД-регулятор

Классический ПИД-регулятор формирует управляющее воздействие по текущей ошибке регулирования, ее накопленному значению и скорости изменения. Он используется как базовый алгоритм для сопоставления с адаптивным и нейросетевым вариантами.

4.3. Адаптивный ПИД-регулятор

Адаптивный ПИД-регулятор использует безопасный базовый набор коэффициентов, обеспечивающий исходную работоспособность контура, и корректирует параметры регулятора в процессе работы. Адаптация предназначена для учета изменения режима стенда и нелинейности объекта.

4.4. Нейросетевой регулятор

Нейросетевой регулятор основан на обучении с подкреплением. На его вход подается телеметрия от исполнительных механизмов и датчиков стенда, а на выходе формируется управляющее воздействие для одного назначенного механизма. Обучение выполняется по системе вознаграждений и штрафов, отражающей качество достижения уставки и нежелательность неблагоприятных режимов управления. Нейросетевая модель работает непосредственно в процессе SoftPLC и может обучаться в ходе экспериментальной отладки.

Поскольку результат регулятора зависит не только от структуры сети, но и от ее начальных параметров, накопленного опыта и правил обучения, разработочные и контрольные прогоны должны быть разделены. В ходе разработочных прогонов допускаются изменение архитектуры, функции вознаграждения и параметров обучения, а также повторение опыта после неудовлетворительного поведения. Такие прогоны служат для настройки и не должны включаться в итоговое сравнительное множество.

Перед контрольной серией версия архитектуры и программного кода, начальные веса либо зафиксированная контрольная точка модели, правила нормализации входов, функция вознаграждения, параметры обучения и режим обновления весов должны быть зафиксированы. Если исследуется онлайн-обучение, все сравниваемые контрольные прогоны должны начинаться из одного и того же состояния модели либо из заранее определенных независимых состояний, сформированных по единому правилу. В противном случае различия между опытами могут быть обусловлены неодинаковой предысторией модели, а не свойствами алгоритма.

5. Программа экспериментальных испытаний

5.1. Факторы экспериментального плана

Матрица испытаний сформирована как полное сочетание трех факторов:

- семи конфигураций «регулируемая величина – исполнительный механизм»;
- трех типов регулятора: PID, APID и AI;
- двух режимов возмущения: без изменения положения РКЗ и с воздействием через РКЗ.

Число базовых сценариев составляет

$$N_{sc} = 7 \cdot 3 \cdot 2 = 42.$$

Повторные прогоны одного сценария в это число не входят. После установления числа повторов общее количество физических запусков будет равно произведению 42 на принятое число повторений, если одинаковое число повторов применяется ко всем сценариям. Семь базовых конфигураций приведены в табл. 2.

Для каждой строки таблицы выполняются шесть вариантов: PID без возмущения, PID с возмущением, APID без возмущения, APID с возмущением, AI без возмущения и AI с возму-

Таблица 2. Базовые конфигурации экспериментальных сценариев

Table 2. Basic configurations of experimental scenarios

№	Регулируемая величина	Управляющий механизм	Характер контура
1	L	ПНП1	Одиночный
2	L	РК1	Одиночный
3	РТ_Т11	ПНП1	Одиночный
4	РТ_Т11	РК1	Одиночный
5	РТ_Т21	РК2	Одиночный
6	РТ_Т11 и РТ_Т21	ПНП1 и РК2	Двухконтурный
7	РТ_Т11 и РТ_Т21	РК1 и РК2	Двухконтурный

щением. Полная матрица из 42 сценариев должна быть приведена в приложении к статье вместе с однозначными идентификаторами опытов.

5.2. Задание уставки и длительность опыта

Изменение уставки во времени задается циклограммой. Продолжительность одного базового опыта составляет 8 ч. Такая продолжительность позволяет исследовать не единичную реакцию на ступенчатое воздействие, а последовательность режимов и длительную работу алгоритма. Циклограмма должна содержать временные отметки, значения уставки и при необходимости служебные этапы стабилизации.

Перед каждым опытом стенд полностью останавливается. Следующий запуск выполняется из исходного нулевого режима, определенного протоколом. Понятие «нулевой режим» должно включать не только нулевую команду насосу, но и исходные положения РК1–РК3, состояние автоматического режима, начальное состояние регулятора, состояние интегральной составляющей и для АИ-регулятора исходную контрольную точку нейросетевой модели.

На текущем этапе выполняется отладка сценариев с регулируемой величиной L. Остальные сценарии входят в запланированную программу и не должны описываться как завершенные до фактического проведения контрольных прогонов.

5.3. Формирование возмущения

РК3 используется для создания внешнего гидравлического возмущения. В исходном замысле его положение изменяется в случайные моменты времени на случайные значения, имитируя неравномерность потребления и колебания располагаемого давления. Такая организация полезна для отладки устойчивости алгоритма, но непосредственное генерирование новой случайной последовательности в каждом прогоне не обеспечивает равенства условий.

Для сравнительной контрольной серии должна применяться одна из двух эквивалентных процедур:

- 1) генерация псевдослучайной последовательности с фиксированным начальным состоянием генератора;
- 2) предварительная запись профиля положения РК3 и его последующее точное воспроизведение во всех сопоставляемых опытах.

Профиль возмущения должен включать временные отметки, заданные положения РКЗ и фактический сигнал обратной связи его привода. Для каждого сравниваемого набора PID–APID–AI используется один и тот же профиль. Диапазон положений, минимальная длительность между переключениями, допустимая скорость изменения и правила ограничения должны быть установлены до начала контрольной серии. При испытании без возмущения РКЗ сохраняет постоянное положение, заранее определенное для соответствующего сценария.

6. Методика проведения и обеспечения повторяемости испытаний

6.1. Подготовка стенда

Перед началом серии выполняются осмотр гидравлических соединений, проверка объема и состояния рабочей жидкости, удаление воздуха автоматическими воздухоотводчиками, проверка показаний местных манометров и электронных преобразователей давления, а также контроль хода РК1–РКЗ по сигналам обратной связи. Проверяется сетевой обмен SoftPLC с CWT-MB 308P и частотным преобразователем. Конфигурация каналов, масштабирующие коэффициенты и единицы измерения сохраняются в паспорте серии.

Для каждого сценария фиксируются:

- идентификатор и версия циклограммы;
- версия SoftPLC и конфигурации ввода-вывода;
- тип и версия регулятора;
- параметры PID или APID либо версия и начальное состояние AI-модели;
- положение РКЗ или идентификатор профиля возмущения;
- начальные положения РК1 и РК2;
- состав, плотность и температура рабочей жидкости на момент запуска;
- период управляющего цикла и период архивирования;
- время начала и окончания опыта;
- случаи ручного вмешательства, аварийной остановки или нарушения связи.

Эксперимент, в котором произошло незапланированное ручное вмешательство, изменение программной версии или потеря обязательного канала данных, не должен автоматически исключаться после просмотра результата. Правила признания прогона технически недействительным устанавливаются до контрольной серии и применяются одинаково ко всем регуляторам.

6.2. Последовательность выполнения опыта

Рекомендуемая последовательность выполнения одного прогона включает следующие операции:

- 1) полная остановка стенда и перевод исполнительных механизмов в предусмотренное исходное состояние;
- 2) загрузка требуемой версии конфигурации, регулятора, циклограммы и профиля возмущения;
- 3) проверка связи, датчиков и позиционной обратной связи кранов;
- 4) запуск синхронного архивирования до подачи первого управляющего воздействия;
- 5) запуск циклограммы и автоматического режима;

- 6) выполнение 8-часовой программы без ручной подстройки алгоритма;
- 7) остановка циклограммы, сохранение архива и журнала диагностики;
- 8) полная остановка установки перед следующим прогоном.

Порядок следования регуляторов в серии не следует постоянно сохранять одинаковым, поскольку медленное изменение состояния жидкости или оборудования может систематически благоприятствовать одному алгоритму. При достаточном числе повторов порядок PID, APID и AI целесообразно рандомизировать либо балансировать, не изменяя при этом профиль уставки и возмущения внутри сопоставляемой группы.

6.3. Повторяемость и число повторов

Механическая конструкция стенда создает возможность воспроизводить исходные гидравлические связи, однако повторяемость сравнительного эксперимента обеспечивается только совокупностью аппаратных и программных условий. К обязательным условиям относятся одинаковая циклограмма, идентичный профиль РКЗ, единое исходное состояние стенда и регулятора, неизменные масштабирующие коэффициенты, фиксированные программные версии, одинаковые ограничения исполнительных механизмов и синхронная регистрация всех каналов.

Число повторов в исходной программе не установлено. До контрольной серии оно должно быть выбрано и применено одинаково для всех сравниваемых алгоритмов. Выбор следует обосновать требуемой точностью оценки и фактическим разбросом пилотных прогонов. Пилотные опыты, используемые для настройки коэффициентов, архитектуры нейросети или функции вознаграждения, учитываются отдельно и не заменяют повторов фиксированного контрольного протокола.

Для снижения влияния меняющихся начальных условий результаты PID, APID и AI целесообразно сопоставлять попарно внутри блоков, имеющих одну и ту же конфигурацию объекта, циклограмму и реализацию возмущения. Такой дизайн позволяет оценивать разность показателей между регуляторами при максимально близких внешних условиях.

6.4. Архивирование данных

Период архивирования должен быть достаточно мал по сравнению как с длительностью переходного процесса объекта, так и с фактическим периодом управляющего цикла. Его конкретное значение до начала контрольной серии фиксируется для всех сценариев. Если часть сигналов записывается с разными периодами, они должны иметь общую временную основу и явные временные метки.

Минимальный состав архива включает:

- заданные и измеренные значения L , PT_{T11} и PT_{T21} в соответствии со сценарием;
- команды ПНП1, РК1, РК2 и РК3;
- фактические положения РК1–РК3;
- заданное и фактическое состояние РКЗ как канала возмущения;
- активный тип регулятора и признак ручного/автоматического режима;
- состояние связи с CWT-MB 308P и частотным преобразователем;
- длительность управляющего цикла либо временные метки, позволяющие ее рассчитать;

- диагностические события, ограничения и защитные переключения;
- параметры частотного преобразователя, необходимые для оценки пусковых токов и энергопотребления, если эти параметры доступны и включены в обмен.

Сырые данные должны сохраняться без предварительного сглаживания. Любая фильтрация, удаление выбросов или восстановление пропусков выполняются на копии данных по заранее описанному правилу. Вместе с обработанными рядами сохраняются исходный архив и программный код расчета показателей.

7. Показатели обработки экспериментальных данных

7.1. Точность регулирования

Для дискретного ряда из N измерений ошибка регулирования определяется как

$$e_i = r_i - y_i,$$

где r_i – значение уставки, y_i – измеренное значение регулируемой величины в момент i .

Основным показателем точности принят среднеквадратический корень ошибки:

$$RMSE = \sqrt{[(1/N) \cdot \sum_{i=1}^N e_i^2]}.$$

RMSE рассчитывается как для полного 8-часового опыта, так и отдельно для установившихся и переходных участков циклограммы. Такое разделение необходимо, поскольку одинаковое интегральное значение может быть получено при существенно различающемся качестве переходного процесса и установившегося режима.

Дополнительно для характеристики точности могут рассчитываться средняя абсолютная ошибка

$$MAE = (1/N) \cdot \sum_{i=1}^N |e_i|$$

и интеграл абсолютной ошибки

$$IAE = \sum_{i=1}^N |e_i| \cdot \Delta t_i,$$

где Δt_i – фактический интервал между соседними измерениями. Использование фактического, а не номинального интервала позволяет учитывать неравномерность временной сетки при наличии джиттера или пропусков.

Для двухконтурных сценариев ошибки PT_T11 и PT_T21 рассчитываются и представляются отдельно. Объединение их в один скалярный показатель допускается только после заранее определенной нормализации, поскольку давления разных контуров могут иметь различные уставки и рабочие диапазоны.

7.2. Качество переходных процессов

Качество перехода между уровнями циклограммы характеризуется временем установления, максимальным отклонением, перерегулированием и установившейся ошибкой. Граница допустимой полосы для определения времени установления должна быть выбрана до обработки данных и одинаково применяться ко всем регуляторам. Для переходов с меняющимся знаком или малой величиной ступени следует использовать абсолютную полосу допуска,

поскольку относительное перерегулирование в таких условиях может становиться неинформативным.

При воздействии РКЗ отдельно определяются максимальное отклонение после возмущения и время восстановления регулируемой величины. В многосвязных режимах дополнительно оценивается отклонение второго контура, вызванное изменением исполнительного механизма первого контура. Такой показатель характеризует способность алгоритма учитывать взаимное влияние каналов.

7.3. Плавность управляющих воздействий и нагрузка исполнительных механизмов

Плавность управления оценивается по полной вариации управляющего сигнала

$$TV(u) = \sum_{i=2}^N |u_i - u_{i-1}|,$$

где u_i – команда исполнительному механизму. Меньшее значение TV при сопоставимой точности указывает на менее интенсивные корректирующие воздействия, однако не должно интерпретироваться отдельно от ошибки регулирования.

Для электроприводов РК1–РК3 по сигналу фактического положения рассчитываются суммарный путь

$$Sp = \sum_{i=2}^N |p_i - p_{i-1}|$$

и число значимых изменений направления движения. Порог значимого изменения должен превышать уровень шума позиционного сигнала и быть одинаковым для всех прогонов. Эти показатели позволяют оценить потенциальную механическую нагрузку и использование ресурса приводов.

Для ПНП1 анализируются скорость изменения команды, число пусков и остановов, максимальный пусковой ток и характер его изменения, если соответствующая телеметрия частотного преобразователя архивируется. Команда частоты сама по себе не является измерением тока или потребленной энергии и должна рассматриваться только как косвенный показатель режима.

7.4. Энергетические и платформенные показатели

При наличии в архиве измеренного значения активной мощности энергопотребление насоса за опыт определяется численным интегрированием:

$$E = \sum_{i=1}^N P_i \cdot \Delta t_i.$$

Если частотный преобразователь не выдает пригодный для этого параметр либо его точность не установлена, для количественной оценки энергопотребления требуется отдельное средство измерения. Подмена фактической энергии интегралом частоты или управляющей команды недопустима; такие величины могут приводиться лишь как явно обозначенные косвенные показатели.

Поскольку одним из объектов исследования является SoftPLC-платформа, технологические метрики целесообразно дополнять платформенными: средним и максимальным периодом

управляющего цикла, джиттером, задержкой обмена с вводом-выводом, загрузкой процессора, использованием оперативной памяти, количеством ошибок связи и временем восстановления после нарушения обмена. Эти данные позволяют подтвердить выполнение алгоритмов на выбранной платформе в требуемом временном режиме. Для вывода о преимуществах относительно аппаратного ПЛК потребовалась бы отдельная серия на референсной аппаратной платформе с тем же объектом, циклограммами и сигналами, которой в текущей матрице нет.

7.5. Представление и статистическое сопоставление

Для каждого сценария должны представляться временные диаграммы уставки, измеренной величины, управляющего сигнала, фактического положения исполнительного механизма и положения РКЗ. В многосвязном режиме временные диаграммы двух контуров строятся на общей временной шкале.

По повторным прогонам для каждого показателя рассчитываются среднее значение, стандартное отклонение и доверительный интервал. Основным объектом сравнения является не единичный наиболее удачный запуск, а распределение показателей по заранее определенному набору контрольных повторов. Если распределение или число повторов не позволяют обоснованно применять параметрический критерий, должны использоваться непараметрические методы либо представление всех индивидуальных значений.

Сравнение должно учитывать компромисс между точностью и интенсивностью управления. Регулятор с меньшей RMSE, но существенно большей полной вариацией команды, числом перемещений приводов или энергопотреблением не может быть признан однозначно более эффективным без заранее установленного приоритета показателей. Поэтому до анализа результатов следует определить основной показатель и порядок интерпретации дополнительных критериев.

8. Ограничения методики и параметры, подлежащие фиксации перед контрольной серией

Разработанный стенд обеспечивает физическую основу для многократной отладки SoftPLC и алгоритмов регулирования, однако границы интерпретации будущих результатов определяются его составом и экспериментальным протоколом.

Во-первых, стенд воспроизводит гидравлические, но не тепловые процессы. Отсутствие источника нагрева, теплообменника и температурных измерительных каналов не позволяет оценивать качество регулирования температуры или тепловую инерцию реального потребителя.

Во-вторых, в настоящее время не установлены коэффициенты геометрического, гидродинамического или временного подобия конкретному промышленному объекту. Поэтому результаты характеризуют сравниваемые алгоритмы на данном функциональном физическом объекте и не должны без дополнительного обоснования переноситься в количественном виде на реальный ЦТП.

В-третьих, матрица из 42 сценариев сравнивает PID, APID и AI в составе одной SoftPLC. Для оценки SoftPLC относительно классической схемы с аппаратным ПЛК необходим отдельный референсный контур и единый протокол регистрации технологических и вычислительных показателей.

В-четвертых, случайное изменение положения РКЗ обеспечивает разнообразие воздействий, но становится воспроизводимым только при фиксации начального состояния генератора либо записи и повторном воспроизведении профиля. До выполнения этого требования сравнение разных регуляторов при «случайном» возмущении не является строго парным.

В-пятых, возможность повторно изменять нейросетевую модель после неудовлетворительного опыта относится к разработочной отладке. Для контрольного сопоставления должны быть заранее разделены обучающие, настроечные и оценочные данные и зафиксировано состояние модели на старте каждого прогона.

До начала контрольной серии в паспорте стенда и протоколе испытаний необходимо окончательно зафиксировать:

- точную модель насосного агрегата и его номинальные характеристики;
- заводскую модификацию панельного компьютера и версию операционной системы;
- концентрацию, плотность и температуру рабочей жидкости;
- объем накопительной емкости и основные геометрические параметры гидравлического тракта, если они используются при интерпретации результатов;
- определение величины L и зависимость ее расчета по измерительному сигналу;
- таблицу каналов, регистров, масштабирующих коэффициентов и единиц измерения;
- период управляющего цикла и период архивирования;
- файлы 8-часовых циклограмм;
- диапазон, временную структуру и воспроизводимый профиль воздействия РКЗ;
- число контрольных повторов и порядок выполнения сценариев;
- параметры и версии PID-, APID- и AI-регуляторов;
- правила признания прогона технически недействительным;
- состав энергетических и платформенных каналов, фактически доступных для архивирования.

Фиксация перечисленных параметров не изменяет конструкцию стенда, но переводит его использование из режима инженерной отладки в режим воспроизводимого сравнительного эксперимента.

Список литературы / References

- [1] Громов Н. К. *Водяные тепловые сети*. М.: Энергоатомиздат, 1988 [Gromov N. K. *Water Heating Networks*. Moscow: Energoatomizdat, 1988 (in Russian)].
- [2] *Типовые требования на автоматизацию центральных тепловых пунктов*. Москва: ООО «СГК», 2023 [Standard Requirements for the Automation of Central Heating Stations. SGK LLC. Moscow, 2023(in Russian)].
- [3] Ефимов С. В., Пушкарев М. И., Фадеев А. С. *Программное обеспечение автоматизированных систем управления технологическими процессами*. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2020. 128 с. [Efimov S. V., Pushkarev M. I., Fadeev A. S. *Software for Automated Process Control Systems*. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishing House, 2020. 128 p. (in Russian)].
- [4] Нежметдинов Р. А. *Принципы и методологические основы построения программных систем логического управления технологическим оборудованием*: автореф. дис. ... д-ра техн.

наук. Самара, 2020 [Nezhmetdinov R. A. *Principles and Methodological Foundations of Building Software Systems for Logical Control of Process Equipment*. Abstract of a Doctor of Engineering Sciences (Engineering) Dissertation. Samara, 2020 (in Russian)].

[5] Бородин Н. К., Кулагин В. А. Совершенствование технологического процесса на тепловых пунктах в системах теплоснабжения. *Журнал СФУ. Техника и технологии*. 2025. 18(3). 300–324 [Borodin N. K., Kulagin V. A. Improvement of the Technological Process at Heating Stations in Heat Supply Systems. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Tech.* 2025. 18(3). 300–324 (in Russian)].

[6] ОВЕН. Датчики давления ПД100. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. URL: https://owen.ru/uploads/387/repd100_1-ru-80708-1.16.pdf (дата обращения: 23.07.2026) [OWEN. PD 100 Pressure Sensors. Operating Manual [Electronic resource]. URL: https://owen.ru/uploads/387/repd100_1-ru-80708-1.16.pdf (accessed: 23.07.2026) (in Russian)].

[7] ComWinTop. CWT-MB 308P Data Acquisition Module [Electronic resource]. URL: <https://store.comwintop.com/products/cwt-mb308p-8ai-4ao-16di-6do-rs485-rs232-ethernet-modbus-rtu-tcp-controller> (accessed: 23.07.2026).

[8] Jinan USR IOT Technology Limited. USR-DR 134 RS 485 to Ethernet Converter [Electronic resource]. URL: <https://www.usr.cn/Product/415.html> (accessed: 23.07.2026).

Theoretical and Applied Heat Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: WTHTMB

УДК 536.468

**Assessment of the Efficiency
of Converting Low-Capacity Industrial Boiler Plants
to Combustion of Coal-Water Suspension**

Viktor R. Vedruchenko* and Aleksandr B. Bashurov

*Omsk State Transport University
Omsk, Russian Federation*

Received 06.04.2026, received in revised form 01.07.2026, accepted 15.07.2026

Abstract. This paper examines the specifics of converting low-capacity boilers to burning two- and three-component coal-water slurries (CWS), which contain a specific proportion of finely ground coal, water, and fuel oil additives to improve flammability. Calculations are presented for the elemental composition and characteristics of the CWS, the volumes of air and combustion products, the available heat of the fuel, and the boiler unit losses. To assess the efficiency of replacing coal with CWS, a thermal analysis of the TP-35U boiler was performed, resulting in comparative efficiency data for different CWS compositions.

Keywords: industrial boilers, coal-water slurry, fuel oil, efficiency coefficient, boiler energy efficiency.

Citation: Vedruchenko V. R., Bashurov A. B. Assessment of the Efficiency of Converting Low-Capacity Industrial Boiler Plants to Combustion of Coal-Water Suspension. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(6), 739–750. EDN: WTHTMB



Оценка эффективности перевода промышленных котельных малой мощности на сжигание водоугольной суспензии

В. Р. Ведрученко, А. Б. Башуров

*Омский государственный университет путей сообщения
Российская Федерация, Омск*

Аннотация. Рассмотрены особенности перевода котлов малой мощности на сжигание двух- и трехкомпонентной водоугольной суспензии (ВУС), содержащей в определенной пропорции мелкоразмолотый уголь, воду и добавки в виде мазута для улучшения воспламеняемости. Представлен расчет элементарного состава и характеристики ВУС, объемов воздуха и продуктов сгорания, располагаемого тепла топлива и потерь котлоагрегата. Для оценки эффективности использования замещения угля на ВУС выполнен тепловой расчет котла ТП-35У, в результате которого получены сравнительные данные коэффициентов полезного действия для разных составов ВУС.

Ключевые слова: промышленные котлы, водоугольная суспензия, мазут, коэффициент полезного действия, энергоэффективность котлов.

Цитирование: Ведрученко В. Р. Оценка эффективности перевода промышленных котельных малой мощности на сжигание водоугольной суспензии / В. Р. Ведрученко, А. Б. Башуров // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(6). С. 739–750. EDN: WTHTMB

Введение

Одной из основных задач в стратегии развития тепловой энергетики России до 2030 года является повышение эффективности и модернизация теплового и энергетического оборудования. В связи с повышением требований экологической безопасности, оптимизацией энергетических и технико-экономических показателей возникает необходимость разработки котлов новых конструкций, соответствующих общим техническим условиям. Одним из направлений по повышению эффективности котельных агрегатов является сжигание углей на основе водоугольных суспензий.

Цель оценки

Целью данной работы является оценка эффективности перевода котлов малой мощности типовой конструкции на сжигание водоугольной суспензии. В основу методологии исследования принят тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) и выполнен поверочный тепловой расчет котла ТП-35У при переводе на сжигание непроектного топлива [1–3]. Метод определения результатов исследования – проведение аналитического и численного расчета коэффициента полезного действия котла с различным составом ВУС.

1. Определение типа топочного устройства

Для проведения поверочного теплового расчета выбран котлоагрегат типа ТП-35У номинальной паропроизводительностью 40 т/час, однобарабанный, вертикально-водотрубный, П-образной компоновки. Камерная топка рассчитана на сжигание каменных и бурых углей

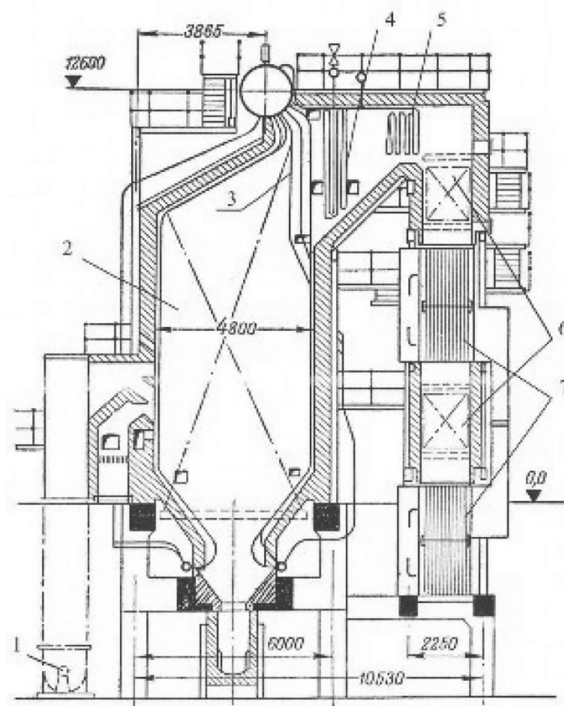


Рис. 1. Схема котла ТП-35У: 1 – мельницы; 2 – топка котла; 3 – фестон; 4 – первая ступень пароперегревателя; 5 – вторая ступень пароперегревателя; 6 – водяной экономайзер; 7 – воздухоподогреватель

Fig. 1. Schematic diagram of the TP-35U boiler: 1 – mills; 2 – boiler firebox; 3 – festoon; 4 – first stage superheater; 5 – second stage superheater; 6 – water economizer; 7 – air heater

различных марок. Горелки размещены на фронтальной стене котла. Все стены топочной камеры экранированы трубами [4–5].

Принципиальная схема котла ТП-35У изображена на рис. 1.

2. Определение элементарного состава и приведенные характеристики топлива

Элементарный состав рабочей массы (содержание углерода C^p , H^p , O^p , влаги W^p) в топливе, %, и основные характеристики (Q_n , кДж/кг) представлены в табл. 1 на основе используемого на Омских ТЭЦ экибастузского угля и мазута М100.

Расчет низшей теплоты сгорания твердого и жидкого топлива проводим по формуле Д.И. Менделеева, кДж/кг:

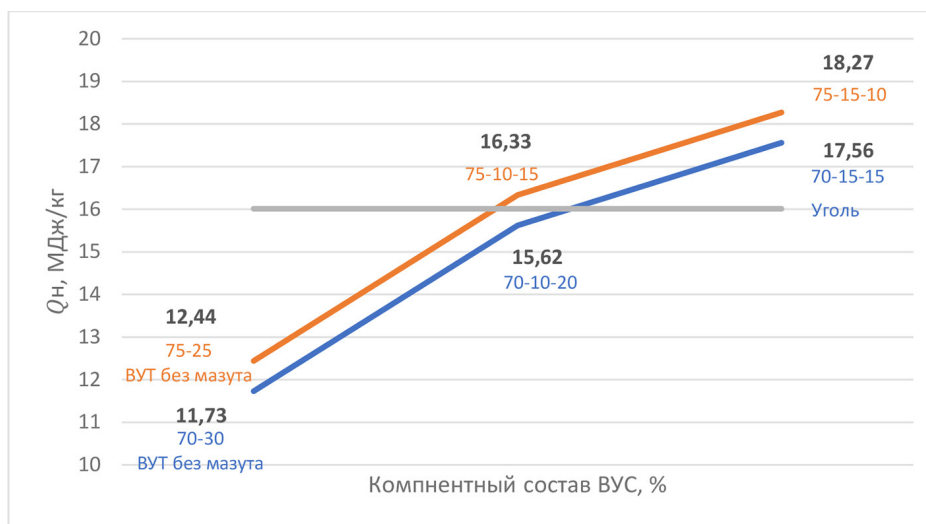
$$Q_n = 339 \cdot C^p + 1030 \cdot H^p - 109 \cdot (O^p - S^p) - 25 \cdot W^p. \quad (1)$$

График на рис. 2 наглядно показывает преимущество применения в составе ВУС мазута по сравнению с двухкомпонентным ВУС. Большая часть составов ВУС по низшей теплоте сгорания практически равноценны и даже превосходят чистый уголь.

Таблица 1. Элементарный состав топлив

Table 1. Elemental composition of fuels

Топливо	Углерод (C^p), %	Водород (H^p), %	Кислород (O^p), %	Сера (S^p), %	Азот (N^p), %	Влажность ($W_{\text{вут}}^p$), %	Зольность (A^p), %	Низшая теплота сгорания Q_n , МДж/кг
Уголь (КСН)	41,1	2,8	6,6	0,8	0,8	7	40,9	16,01
Мазут М100	86	11	0,8	2	0,3	0,5	0,05	40,6
Двухкомпонентный ВУС уголь-вода, %								
70–30	28,77	5,29	31,29	0,56	0,56	4,9	28,63	11,73
75–25	30,83	4,87	27,18	0,6	0,6	5,25	30,68	12,44
Трехкомпонентный ВУС уголь-мазут-вода, %								
70–10–20	37,37	5,28	22,48	0,76	0,59	4,95	28,64	15,62
70–15–15	41,67	5,27	18,07	0,86	0,61	4,98	28,64	17,56
75–10–15	39,43	4,86	18,36	0,8	0,63	5,3	30,68	16,33
75–15–10	43,72	4,86	13,96	0,9	0,64	5,3	30,68	18,27

Рис. 2. График зависимости низшей теплоты сгорания Q_n от качественного состава ВУСFig. 2. Graph of the dependence of the net calorific value Q_n on the qualitative composition of the VUS

3. Определение объемов воздуха и продуктов сгорания

Теоретический объем продуктов сгорания при коэффициенте избытка воздуха = 1:

а) теоретический объем воздуха, $\text{м}^3/\text{кг}$:

$$V^0 = 0,0889 \cdot (C^p + 0,375 \cdot S^p) + 0,265 \cdot H^p - 0,0333 \cdot O^p, \quad (2)$$

б) теоретический объем азота, м³/кг,

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V^0 + 0,8 \cdot N^p / 100. \quad (3)$$

в) теоретический объем водяных паров, м³/кг,

$$V_{H_2O}^0 = 0,111 \cdot H^p + 0,0124 \cdot W^p + 0,0161 \cdot V^0, \quad (4)$$

г) объем трехатомных газов, м³/кг,

$$V_{RO_2} = 0,01866 \cdot (C^p + 0,3785 \cdot S^p). \quad (5)$$

Результат определения теоретических объемов воздуха и продуктов сгорания представлен в табл. 2.

Таблица 2. Теоретические объемы

Table 2. Theoretical volumes

Топливо	Объем воздуха, м ³ /кг V^0	Объем азота, м ³ /кг $V_{N_2}^0$	Объем водяных паров, м ³ /кг $V_{H_2O}^0$	Объем трехатомных газов, м ³ /кг, V_{RO_2}
Уголь (КСН)	4,2	3,3	0,5	0,77
Двухкомпонентный ВУС уголь-вода, %				
70–30	2,9	2,3	0,7	0,54
75–25	3,1	2,5	0,7	0,58
Трехкомпонентный ВУС уголь-мазут-вода, %				
70–10–20	4,0	3,2	0,7	0,7
70–15–15	4,5	3,6	0,7	0,78
75–10–15	4,2	3,3	0,7	0,74
75–15–10	4,7	3,7	0,7	0,82

Действительное количество воздуха, поступающего в топку. Выбираем коэффициент избытка воздуха $\alpha_{cp} = 1,2$ для угля (табл. XVIII [1]) и 1,1 для ВУС. Объем газов $V_{RO_2}^0$ от коэффициента избытка воздуха не зависит и остается постоянным.

Реальный объем продуктов сгорания:

а) объем двухатомных газов, м³/кг,

$$V_{N_2} = V_{N_2}^0 + (\alpha_{cp} - 1) \cdot V^0, \quad (6)$$

б) объем водяных паров, м³/кг,

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161 \cdot (\alpha_{cp} - 1) \cdot V^0, \quad (7)$$

в) общий объем продуктов сгорания, м³/кг,

$$V_r = V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O}, \quad (8)$$

объемные доли трехатомных газов

$$r_{RO_2} = V_{RO_2}/V_{\Gamma}, \quad (9)$$

$$r_{H_2O} = V_{H_2O}/V_{\Gamma}. \quad (10)$$

Для золы топлива, уносимой газами: $a_{yn} = 0,95$ (табл. XVIII [1]).

Масса дымовых газов:

$$G_{\Gamma} = 1 - A^p/100 + 1,306 \cdot \alpha_{cp} \cdot V^0. \quad (11)$$

Концентрация золы в дымовых газах:

$$\mu_{зл} = A^p \cdot a_{yn}/100 \cdot G_{\Gamma}. \quad (12)$$

Результат проведенных расчетов по определению продуктов сгорания в зависимости от качественного состава ВУС представлен в табл. 3.

График на рис. 3 наглядно показывает, что в результате применения в составе ВУС мазута уменьшается количество концентрации золы в дымовых газах на 30 % по сравнению с двух-компонентным ВУС и чистым углем.

Таблица 3. Средние объемные характеристики продуктов сгорания в топке котла

Table 3. Average volumetric characteristics of combustion products in the boiler furnace

Характеристики продуктов сгорания в топке котла	Обо- зна- чение	Уголь 100 %	ВУС (уголь-мазут-вода), %					
			70–0–30	75–0–25	70–10–20	70–15–15	75–10–15	75–15–10
Для золы, уносимой газами	a_{yn}	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Средний коэффициент избытка воздуха	α_{cp}	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Объем трехатомных газов, м ³ /кг	V_{RO_2}	0,77	0,54	0,58	0,7	0,78	0,74	0,82
Объем азота, м ³ /кг	V_{N_2}	4,17	2,62	2,81	3,56	4,04	3,75	4,22
Объем водяных паров, м ³ /кг	V_{H_2O}	0,48	0,70	0,66	0,72	0,73	0,68	0,69
Суммарный объем газов, м ³ /кг	V_{Σ}	5,42	3,86	4,05	4,98	5,55	5,17	5,74
Объемная доля:								
- трехатомных газов	r_{RO_2}	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
- водяных паров	r_{H_2O}	0,09	0,18	0,16	0,14	0,13	0,13	0,12
Суммарная доля трехатомных газов и водяных паров	r_n	0,23	0,32	0,31	0,29	0,27	0,27	0,26
Масса дымовых газов, кг/кг	G_{Σ}	7,18	4,93	5,21	6,46	7,22	6,74	7,50
Концентрация золы в дымовых газах, кг/кг	$\mu_{зл}$	0,054	0,053	0,054	0,042	0,038	0,043	0,039

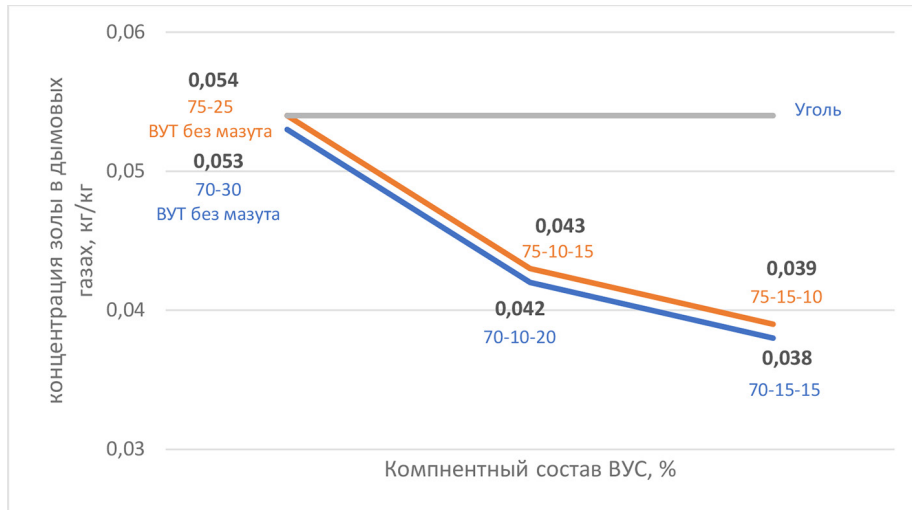


Рис. 3. График зависимости концентрации золы в дымовых газах от качественного состава ВУС

Fig. 3. Graph of the dependence of ash concentration in flue gases on the qualitative composition of the VUS

4. Определение энтальпии воздуха и продуктов сгорания

а) энтальпия теоретического объема воздуха, кДж/кг,

$$H_B^0 = V^0 \cdot (c\vartheta)_B, \quad (13)$$

где $(c\vartheta)_B$ – удельная энтальпия воздуха, кДж/м³;

б) энтальпия теоретического объема продуктов сгорания, кДж/кг,

$$H_r^0 = V_{RO_2} \cdot (c\vartheta)_{CO_2} + V_{N_2}^0 \cdot (c\vartheta)_{N_2} + V_{H_2O}^0 \cdot (c\vartheta)_{H_2O}, \quad (14)$$

где $(c\vartheta)_{CO_2}$, $(c\vartheta)_{N_2}$, $(c\vartheta)_{H_2O}$ – удельная энтальпия двух- и трехатомных, кДж/м³;

в) энтальпия золы в продуктах сгорания, кДж/кг,

$$H_{зл} = (c\vartheta)_{зл} \cdot \frac{A^p}{100} \cdot a_{ун}, \quad (15)$$

где $(c\vartheta)_{зл}$ – удельная энтальпия золы, кДж/кг;

г) энтальпия действительного объема продуктов сгорания, кДж/кг,

$$H_r = H_r^0 + (\alpha_{cp} - 1) \cdot H_B^0 + H_{зл}. \quad (16)$$

Значения удельной энтальпии $(c\vartheta)_B$, $(c\vartheta)_{CO_2}$, $(c\vartheta)_{N_2}$, $(c\vartheta)_{H_2O}$, $(c\vartheta)_{зл}$ определяем по [1] (табл. 4).

5. Определение располагаемого тепла топлива

а) располагаемое тепло для твердого и жидкого топлива, кДж/кг,

$$Q_p^p = Q_n + Q_{тл}, \quad (17)$$

где Q_n – низшая теплота сгорания, кДж/кг;

б) физическое тепло топлива, кДж/кг,

$$Q_{\text{тл}} = c_{\text{тл}} \cdot (t_{\text{тл}} - 273), \quad (18)$$

где $c_{\text{тл}}$ – теплоемкость рабочего топлива, кДж/(кг·К), $t_{\text{тл}}$ – температура топлива, К;

в) теплоемкость твердого топлива, кДж/(кг·К), при $t_{\text{мл}} = 293 \text{ К}$ (20 °С),

$$c_{\text{тл}} = 0,042 \cdot W^{\text{P}} + c_{\text{тл}}^{\text{с}} \cdot (1 - 0,01 \cdot W^{\text{P}}), \quad (19)$$

где $c_{\text{тл}}^{\text{с}} = 1,09$ теплоемкость сухой массы каменного угля, кДж/(кг·К);

г) теплоемкость мазута, кДж/(кг·К), при $t_{\text{тл}}^{\text{М}} = 293 \text{ К}$ (20 °С),

$$c_{\text{тл}}^{\text{М}} = 1,739 + 0,0025 \cdot (t_{\text{тл}}^{\text{М}} - 273), \quad (20)$$

где $t_{\text{тл}}^{\text{М}}$ – температура мазута, К.

Теплоемкость ВУС определяем пропорционально составляющим компонентам.

Результат проведенных расчетов по определению располагаемого тепла в зависимости от качественного состава ВУС приведен в табл. 5.

График на рис. 4 показывает, что в результате применения в составе ВУС мазута значительно увеличивается доля располагаемого тепла.

Таблица 4. Значения энтальпии действительного объема продуктов сгорания [1, табл. XIV]

Table 4. Enthalpy values of the actual volume of combustion products [1, Table XIV]

Расчетная температура ϑ , °С	Энтальпия продуктов сгорания в топке парового котла $H_{\text{г}}$, кДж/кг						
	Уголь	ВУС (уголь-мазут-вода), %					
		70–0–30	75–0–25	70–10–20	70–15–15	75–10–15	75–15–10
30	32,36	11,30	12,12	15,39	17,44	16,21	18,25
100	778,39	560,79	565,16	714,36	791,14	741,33	818,11
200	1577,92	1137,01	1145,94	1447,73	1603,08	1502,51	1657,86
300	2402,34	1732,19	1745,82	2204,46	2440,59	2287,92	2524,06
400	3245,95	2341,37	2359,81	2978,89	3297,64	3091,69	3410,44
500	4114,20	2968,83	2992,19	3776,25	4179,96	3919,16	4322,87
600	5004,94	3613,28	3641,68	4594,87	5085,67	4768,68	5259,47
700	5916,45	4273,29	4306,82	5433,07	6012,96	5638,36	6218,24
800	6842,81	4945,24	4983,98	6285,88	6956,20	6523,06	7193,38
900	7791,57	5634,27	5678,35	7159,80	7922,57	7429,48	8192,25
1000	8752,85	6333,61	6383,08	8046,38	8902,77	8348,87	9205,26
1100	9720,95	7038,96	7093,94	8939,82	9890,25	9275,10	10225,53
1200	10705,63	7757,18	7817,63	9849,53	10895,71	10218,08	11264,26
1300	11692,18	8478,28	8545,12	10757,44	11897,02	11159,02	12298,60
1400	12735,98	9239,94	9314,52	11713,21	12949,85	12150,47	13387,11
1600	14788,11	10742,35	10829,52	13607,85	15040,60	14113,83	15546,58
1800	16875,85	12273,87	12374,00	15537,20	17168,87	16112,83	17744,50
2000	18659,54	13336,84	13450,36	16988,43	18814,23	17660,79	19486,59

Таблица 5. Располагаемое тепло для твердого и жидкого топлива

Table 5. Available heat for solid and liquid fuels

Характеристики продуктов сгорания в топке котла	Обо- зна- чение	Уголь 100 %	ВУС (уголь-мазут-вода), %					
			70–0–30	75–0–25	70–10–20	70–15–15	75–10–15	75–15–10
Теплоемкость рабоче- го топлива, кДж/(кг·К)	$c_{мл}$	1,31	0,92	0,98	1,10	1,19	1,16	1,25
Физическое тепло топлива, кДж/кг	$Q_{мл}$	26,15	18,34	19,65	21,92	23,71	23,23	25,02
Низшая теплота сгора- ния, МДж/кг	Q_n	16,01	11,73	12,44	15,62	17,56	16,33	18,27
Располагаемое тепло топлива, МДж/кг	Q_p^p	16,04	11,75	12,46	15,64	17,58	16,35	18,29

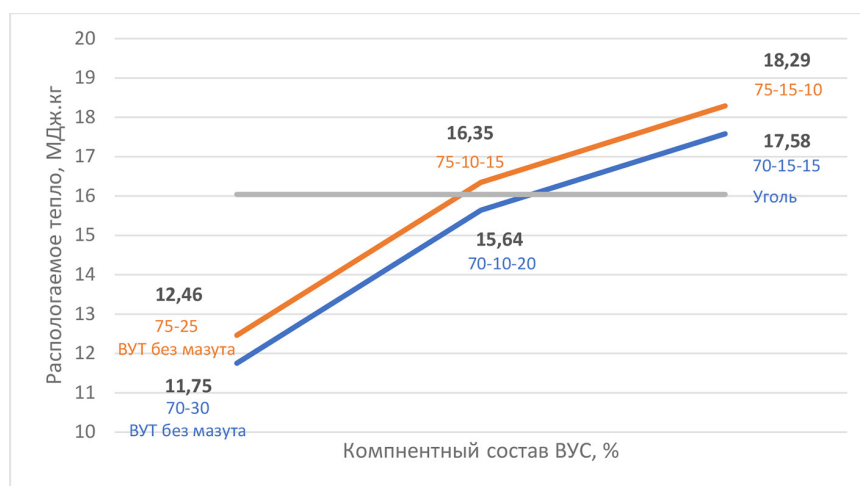


Рис. 4. График располагаемого тепла от качественного состава ВУС

Fig. 4. Graph of available heat from the qualitative composition of the VUS

6. Определение потерь котлоагрегата

а) потери тепла с уходящими газами, %,

$$q_2 = (H_{yx} - \alpha_{yx}^{cp} \cdot H_{x.v}^0) / Q_p^p \cdot (1 - q_4/100) \cdot 100, \quad (21)$$

где H_{yx} – энтальпия уходящих из котла газов при заданной температуре уходящих газов, кДж/кг, (табл. 6), α_{yx}^{cp} – коэффициент избытка воздуха в последнем газоходе, средний по газоходу.

При поверочном расчете топочной камеры котлоагрегата значение температуры газов на выходе из топки котла ТП-35У при работе на угольном топливе составляет 180 °С. При сжигании ВУС в связи с испарением влаги происходит увеличение времени воспламенения топлива, что приводит к затягиванию факела в топке котла и повышению температуры газов на выходе. При использовании ВУС температура уходящих газов в целом повышается на 25–30 °С и составляет примерно 200 °С.

Таблица 6. Значения энтальпии уходящих газов

Table 6. Exhaust gas enthalpy values

Расчетная температура ϑ , °С	Энтальпия уходящих газов за I ступенью воздухоподогревателя H_{yx} , кДж/кг						
	Уголь $a_{yx}=1,39$	ВУС (уголь-мазут-вода), %; $a_{yx}=1,32$					
		70–0–30	75–0–25	70–10–20	70–15–15	75–10–15	75–15–10
100	884,35	646,51	657,04	831,08	923,36	864,21	956,50
200	1791,12	1309,49	1330,81	1682,58	1869,12	1749,76	1936,30

$H_{х.в}^0$ – энтальпия холодного воздуха, определяется по формуле (14),

б) потери тепла с химическим недожогом топлива $q_3 = 0,5 \%$;

в) потери тепла с механическим недожогом топлива $q_4 = 3,0 \%$.

При сгорании ВУС доля недожога топлива уменьшается и, как следствие, происходит уменьшение потери тепла с недожогом. В рамках исследования оставим показатели q_3 и q_4 одинаковыми;

г) потери тепла от наружного охлаждения котла $q_5 = 1,1$ (с. 30 [1]). В целях уменьшения потерь теплоты от химической и механической неполноты сгорания топлива рекомендуется предусмотреть подогрев наружного воздуха, что дополнительно поспособствует сокращению времени выгорания топлива [7];

д) потери тепла с физическим теплом шлаков, %,

$$q_6 = a_{шл} \cdot (c\vartheta)_{шл} \cdot A^p / Q_p^p, \quad (22)$$

где $a_{шл} = 1 - a_{ун}$, размер шлакоулавливания в топочной камере, $(c\vartheta)_{шл} = 560$ кДж/кг, энтальпия шлака при температуре 600 °С (табл. XIV [1]).

7. Определение КПД

Коэффициент полезного действия котлоагрегата определяем по уравнению обратного баланса, %,

$$\eta_k = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6). \quad (23)$$

Результаты проведенных расчетов по определению КПД приведены в табл. 7.

Выводы

1. В результате проведенных расчетов по определению КПД котлоагрегата при переводе на сжигание водоугольной суспензии установлено, что данный показатель в большей степени зависит от потери тепла с уходящими газами, но остается в пределах номинальной работы и подтверждает свою эффективность. Для определения оптимальных параметров необходимо разработать режимные карты работы котла на проектном топливе.

2. Установлено, что трехкомпонентный ВУС с добавлением мазута по низшей теплоте сгорания не уступает угольному топливу, возрастает доля располагаемого тепла, уменьшается количество золы в дымовых газах.

Таблица 7. Определение КПД котлоагрегата

Table 7. Determination of boiler efficiency

Параметры	Обозначение	Уголь	ВУС (уголь-мазут-вода), %					
			70–0–30	75–0–25	70–10–20	70–15–15	75–10–15	75–15–10
Энтальпия уходящих из котла газов, кДж/кг	H_{yx}	1609,76	1309,49	1330,81	1682,58	1869,12	1749,76	1936,30
Энтальпия холодного воздуха, кДж/кг $t_{x,в} = 30$	H_B^0	161,80	113,04	121,17	153,93	174,37	162,06	182,50
Коэффициент избытка воздуха в газоходе	α_{yx}^{cp}	1,37	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30
Потери тепла с уходящими газами, %	q_2	8,40	9,60	9,13	9,19	9,06	9,13	9,01
Потери тепла с химическим недожогом топлива, %	q_3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Потери тепла с механическим недожогом топлива, %	q_4	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Потери тепла от наружного охлаждения котла	q_5	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Потери тепла с физическим теплом шлаков, %	q_6	0,071	0,068	0,069	0,051	0,046	0,053	0,047
КПД котла, %	$\eta_{к.а}$	86,93	85,73	86,20	86,16	86,29	86,22	86,35

3. При переводе котельных на сжигание ВУС также необходимо уделить особое внимание на влияние температуры на конвективные поверхности котла, повышение стабильности распыления и горения суспензии, степени полноты ее выгорания, а также на поддержание заданного температурного уровня.

Список литературы / References

- [1] Кузнецов Н.В., Митор В.В. и др. *Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод)*. М.: Энергия, 1973. Т. 1. 296 с. [Kuznetsov N.V., Mitor V.V. et al. *Thermal calculation of boiler units (normative method)*. Moscow, Energy, 1973. Vol. 1. 296 p. (in Russian)]
- [2] Каган Г.М. *Тепловой расчет котлов (Нормативный метод)*. Изд. 3, перераб. и доп. СПб.: Изд. НПОЦКТИ, 1998. 256 с. [Kagan G.M. *Thermal calculation of boilers (Normative method)*. 3 ed., revised and enlarged. St. Petersburg, Publishing House of NPOTSKTI, 1998. 256 p. (in Russian)]
- [3] Голдобин Ю.М., Витт О.К., Гальперин Л.Г. *Термофизические свойства топлив, продуктов сгорания и воздуха. Приложение к методическим указаниям*. Екатеринбург: изд. УГТУ-УПИ, 1994. 26 с. [Goldobin Y.M., Witt O.K., Galperin L.G. *Thermophysical properties of fuels, combustion products and air. Appendix to the guidelines*. Ekaterinburg, Publishing House of USTU-UPI, 1994. 26 p. (in Russian)]

[4] Роддатис К.Ф., Полtareцкий А. Н. *Справочник по котельным установкам малой производительности*. М.: Энергоатомиздат, 1989. 487 с. [Roddatis K. F., Poltaretsky A. N. *Handbook of low-capacity boiler plants*. Moscow, Energoatomizdat, 1989. 487 p. (in Russian)]

[5] Делягин Г.И., Лебедев В. И., Пермяков Б. А. *Теплогенерирующие установки*. М.: Энергоатомиздат, 1986. 586 с. [Delyagin, G.I., Lebedev V. I., Permyakov B. A. *Heat-generating installations*. Moscow, Energoatomizdat, 1986. 586 p. (in Russian)]

[6] Шарабура Т.А., Пинчук В.А., Шевченко Г.Л., Кузьмин А.В. Особенности перевода котлов средней и малой мощности на водоугольное топливо. *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*, 2012, 1(9), С. 97–105 [Sharabura T. A., Pinchuk V. A., Shevchenko G. L., Kuzmin A. V. Features of the conversion of medium and low-power boilers to coal-water fuel. *Modern science: research, ideas, results, technologies*, 2012, 1 (9), 97–105 (in Russian)]

[7] Вулканов Е.И., Делягин Г. Н., Кирсанов В. И., Леваневский В. С., Онищенко А. Г. *Исследование топочного процесса в паровом котле при сжигании водоугольной суспензии. – «Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий»*. М.: Наука, 1967. С. 122–135 [Vulkanov E. I., Delyagin G. N., Kirsanov V. I., Levanevskiy V. S., Onishenko A. G. *The research of furnace process in the boiler combustion of water-coal slurry. – «Combustion of highly watered fuel in the form of water- coal slurry»*. Moscow, Nauka, 1967. P. 122–135 (in Russian)]

Theoretical and Applied Heat Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: TZKOUR

УДК 620.91

Investigation of Physical Parameters
of Pellets from Illiquid Wood

Elena N. Grigorieva*,
Evgeniy V. Egoshin and Aleksandr A. Efimov
*Volga State University of Technology
Yoshkar-Ola, Russian Federation*

Received 28.11.2025, received in revised form 01.07.2026, accepted 15.07.2026

Abstract. The use of business wood for the production of fuel pellets has a negative impact on the forest balance of the Russian Federation, and also leads to increased competition between pellet producers and manufacturers of other types of wood chip products, such as chipboard (MDF, chipboard, fiberboard, etc.). To solve this problem, a device for the production of pellets from illiquid wood has been developed. with the addition of technical lignin as a binder. The device is equipped with an NMR analyzer that transmits data on the quality of the feedstock to a PC. The results of experimental studies of the physical parameters of illiquid wood fuel pellets, such as heat of combustion, degree of abrasion, bulk density, humidity and ash content, are presented. The studies were conducted using standard methods for solid biofuels. The dependences of the pellet parameters on the percentage of lignin in the feedstock and the pressing temperature are described using regression equations and represent a polynomial of the third degree. The fulfillment of the condition for the minimum number of experiments ensuring the specified accuracy of measurement results was verified using the Student's criterion according to the Romanovsky V.I. method. Reproducibility was calculated using the Kohren criterion. The accuracy of determining the coefficients in the regression equations has been established. In the course of experimental studies, a rational technological regime for the production of fuel pellets from illiquid wood has been identified, which will meet existing standards for the quality of pellets. The influence of the thermophysical characteristics of illiquid wood fuel pellets on their properties and efficiency of use has been determined.

Keywords: illiquid wood, technical lignin, NMR, heat of combustion, degree of abrasion, bulk density, ash content.

Citation: Grigorieva E. N., Egoshin E. V., Efimov A. A. Investigation of Physical Parameters of Pellets from Illiquid Wood. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(6), 751–760. EDN: TZKOUR



Исследование физических показателей пеллет из неликвидной древесины

Е. Н. Григорьева, Е. В. Егошин, А. А. Ефимов

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

Аннотация. Использование деловой древесины для производства топливных пеллет негативно отражается на лесном балансе РФ, а также приводит к росту конкуренции между производителями пеллет и производителями других видов продукции из щепы, например древесно-стружечных плит (МДФ, ДСП, ДВП и др.). Для решения данной проблемы было разработано устройство для производства пеллет из неликвидной древесины с добавлением технического лигнина в качестве связующего вещества. Устройство оснащено ЯМР-анализатором, который передает данные о качестве исходного сырья на ПК. Приведены результаты экспериментальных исследований физических параметров топливных пеллет из неликвидной древесины, таких как теплота сгорания, степень истирания, плотность насыпного слоя, влажность и зольность. Исследования проводились по стандартным методикам для твердого биотоплива. Зависимости параметров пеллет от процентного содержания лигнина в исходном сырье и температуры прессования описываются с помощью регрессионных уравнений и представляют собой полином третьей степени. Выполнение условия минимального количества опытов, обеспечивающего заданную точность результатов измерений, проверено с помощью критерия Стьюдента по методике В. И. Романовского. Воспроизводимость рассчитана с помощью критерия Кохрена. Установлена точность определения коэффициентов в уравнениях регрессии. В ходе экспериментальных исследований выявлен рациональный технологический режим производства топливных пеллет из неликвидной древесины, которые будут соответствовать существующим стандартам к качеству гранул. Определено влияние теплофизических характеристик топливных пеллет из неликвидной древесины на их свойства и эффективность использования.

Ключевые слова: неликвидная древесина, технический лигнин, ЯМР, теплота сгорания, степень истирания, плотность насыпного слоя, зольность.

Цитирование: Григорьева Е. Н. Исследование физических показателей пеллет из неликвидной древесины / Е. Н. Григорьева, Е. В. Егошин, А. А. Ефимов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(6). С. 751–760. EDN: TZKQUD

Введение

В рамках экологической политики РФ в области энергетики предусматривается снижение негативного воздействия топливно-энергетического комплекса на окружающую среду и реализация комплексного подхода к использованию природных ресурсов. Производство древесных пеллет с добавлением других видов биомассы снижает нагрузку на лесную отрасль, ослабляет конкуренцию между пеллетными и плитными производствами, улучшает экологический баланс. Одним из перспективных направлений создания и развития новых технологий производства тепловой энергии является применение топливных пеллет из неликвидной древесины. При сжигании пеллет высвобождается такое количество углекислого газа (CO_2), которое было накоплено древесиной во время роста.

Теплофизические свойства пеллет и методика их оценки рассмотрены в [1]. Особенности процесса изготовления пеллет в зависимости от породы древесины, ее физических параметров, обеспечивающих устойчивость к разрушению при транспортировке (степень истирания); объема,

занимаемого при хранении (плотности насыпного слоя); качества, теплотворности, плотности и целостности (влажности); образования отложений и засорения оборудования (зольности) [2, 3, 4], а также параметров самого процесса прессования [5–9] посвящены работы как отечественных, так и зарубежных ученых.

Однако все исследования касались пеллет из деловой древесины.

Изготовление пеллет из неликвидной древесины с добавлением технического лигнина:

- приведет к повышению эффективности теплофизических параметров горения;
- позволит использовать для производства пеллет пораженную гнилью древесину;
- позволит решить проблему нерационального потребления лесных ресурсов за счет переработки неликвидной древесины и использования ее в энергетических целях.

В первую очередь это касается древесины, пораженной коррозийным типом гнили, химические и физические параметры которой хорошо изучены [10]. По данным центра защиты леса Республики Марий Эл, на конец 2024 года только корневой губкой были ослаблены сосновые насаждения на площади 3672,4 га. Недостаток лигнина в такой древесине может быть восполнен путем добавления технического лигнина, который является отходом целлюлозно-бумажных производств (сегодня по разным оценкам его накоплено от 100 до 200 млн т).

Развитие данного направления использования древесины сдерживается тем, что в настоящее время не разработаны технологические решения по производству качественного древесного топлива (пеллет) с использованием пораженного гнилью древесного сырья.

Обзор литературы показал, что до настоящего времени неликвидная древесина при производстве пеллет фактически не используется, что делает исследуемый вопрос актуальным, имеющим как практическую, так и научную значимость.

Целью работы является анализ физических параметров топливных пеллет из неликвидной древесины, таких как теплота сгорания, степень истирания, плотность насыпного слоя, влажность и зольность.

Для выполнения поставленной цели было необходимо решить ряд задач:

- 1) провести эксперименты по определению физических параметров каждого вида пеллет;
- 2) проверить выполнение условия минимального количества опытов, обеспечивающего заданную точность результатов измерений;
- 3) выявить рациональный технологический режим производства пеллет из неликвидной древесины.

Методика исследований

Приготовление образцов

Устройство для производства пеллет из неликвидной древесины представлено на рис. 1 [11].

Объем добавляемого в сырье лигнина зависит от степени поражения древесины гнилью, которая определяется ЯМР-анализатором «Spin Track». Он установлен в шлюзе 12. ЯМР-анализатор передает данные о качестве исходного сырья на ПК в онлайн-режиме. Графики зависимостей стадии повреждения неликвидной древесины гнилью от относительной доли твердого компонента a_s и относительной доли воды a_l в образце представлены на рис. 2 [12].

Зависимости описываются с помощью регрессионных уравнений и представляют собой полином третьей степени.

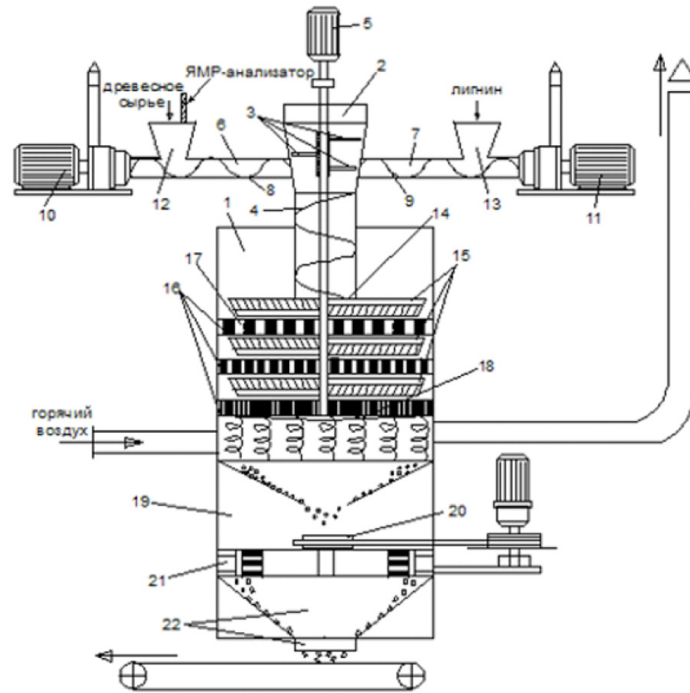


Рис. 1. Устройство для производства пеллет: 1 – корпус; 2 – бункер смешения сырья; 3 – мешалки; 4 – вертикальный шнек; 5 – электродвигатель; 6, 7 – линии подачи древесного сырья и лигнина; 8, 9 – шнеки; 10, 11 – электродвигатели; 12, 13 – шлюзы для подачи древесного сырья и лигнина соответственно; 14 – вал; 15 – рубительные ножи; 16 – неподвижные диски; 17 – калибровочные отверстия; 18, 20 – дозатор; 19 – сушильная камера; 21 – пресс-гранулятор; 22 – сопло

Fig. 1. Pellet production device: 1 – housing; 2 – hopper for mixing raw materials; 3 – agitators; 4 – vertical screw; 5 – electric motor; 6, 7 – feed lines for wood raw materials and lignin; 8, 9 – augers; 10, 11 – electric motors; 12, 13 – sluices for feeding wood raw materials and lignin, respectively; 14 – shaft; 15 – chopping knives; 16 – fixed discs; 17 – calibration holes; 18, 20 – dispenser; 19 – drying chamber; 21 – press granulator; 22 – nozzle

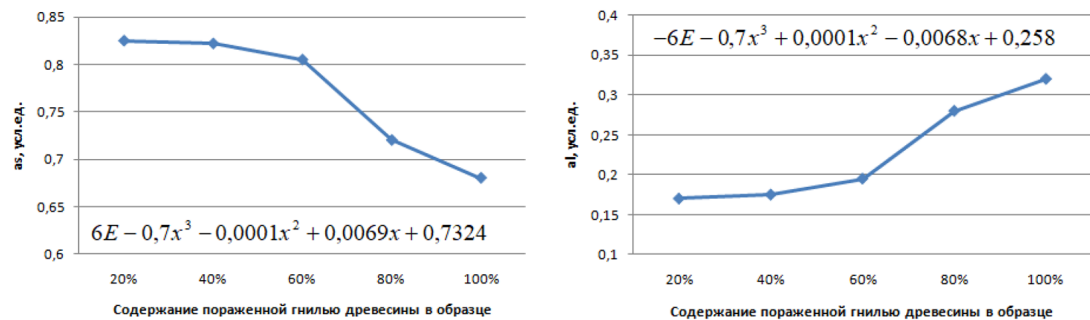


Рис. 2. Зависимости стадии повреждения неликвидной древесины гнилью от относительной доли твердого компонента a_s и относительной доли воды a_1 в образце

Fig. 2. The presence of the stage of damage to illiquid wood by rot from the relative proportion of the solid component, as well as the relative proportion of water in the sample

Методика проведения исследований

Для исследования параметров пеллет из неликвидной древесины в качестве сырья были определены произрастающие на территории Республики Марий Эл сосна, ель, береза. Образцы отбирались в учебно-опытном лесхозе (филиале) ФГБОУ ВО «ПГТУ».

«В ходе проведенных экспериментов исследовались образцы пеллет из неликвидной древесины диаметром 6 мм и длиной 40 мм с различным процентным содержанием лигнина 20, 30, 40, 50, 60 %. Температура прессования составляла 85, 90 и 95 °С. Давление прессования составляло 300 бар, а время – 0,4 сек» [13].

Определение параметров пеллет проводилось по стандартным методикам для твердого биотоплива. Проверка однородности дисперсии параллельных опытов для подтверждения нормального закона распределения ошибок отдельных опытов проведена с помощью критерия Кохрена (G-критерий). Выполнение условия минимального количества опытов, обеспечивающего заданную точность результатов измерений, проверено с помощью критерия Стьюдента по методике В. И. Романовского [14].

Результаты и обсуждения

В ходе экспериментальных исследований получены графики зависимостей энергии (теплоты) сгорания (рис. 3), зольности (рис. 4), влажности (рис. 5), плотности насыпного слоя (рис. 6) и степени истирания (рис. 7) пеллет из неликвидной древесины в зависимости от процентного содержания лигнина в исходном сырье и температуры прессования. Зависимости описываются с помощью регрессионных уравнений и представляют собой полином третьей степени.

С целью подтверждения нормального закона распределения ошибок отдельных опытов была проведена проверка однородности дисперсии параллельных опытов с помощью критерия Кохрена (G-критерий) в программе MathCAD (табл. 1). Это обеспечило корректность регрессионного анализа экспериментальных данных и возможность расчета коэффициентов регрессии.

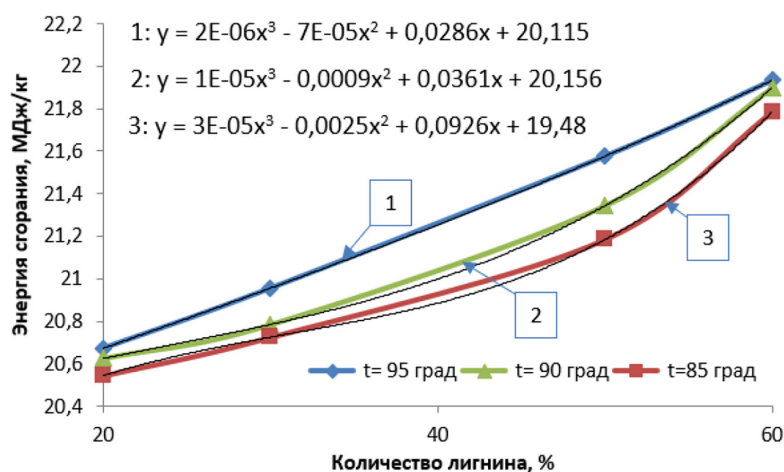


Рис. 3. Изменение энергии (теплоты) сгорания

Fig. 3 Change in the energy (heat) of combustion

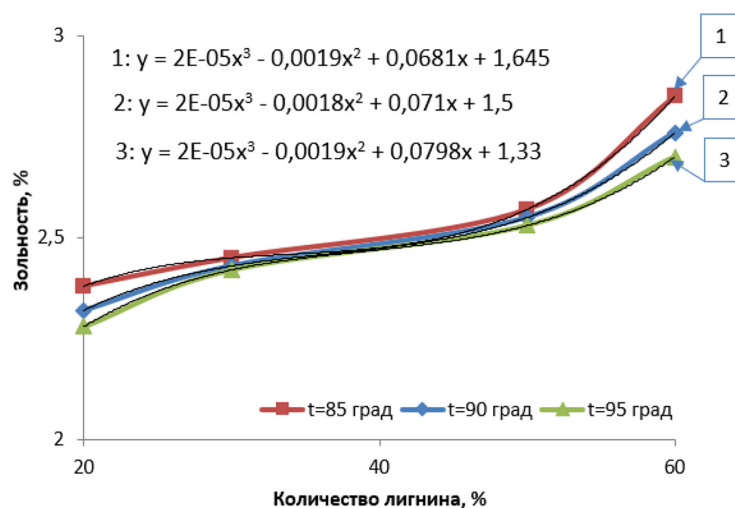


Рис. 4. Изменение зольности

Fig. 4. Change in ash content

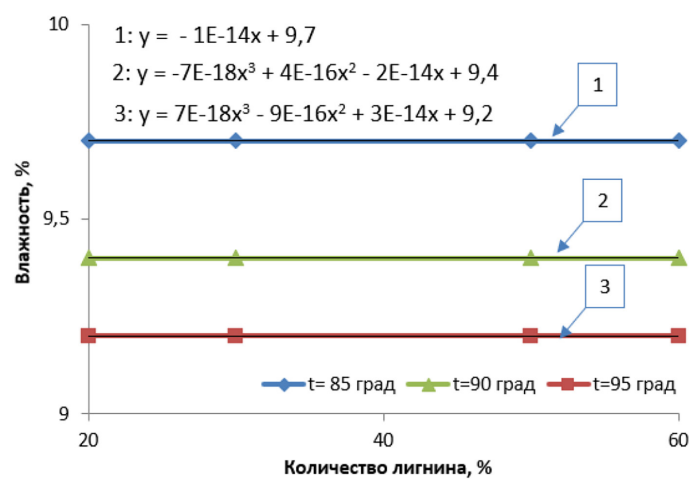


Рис. 5. Изменение влажности

Fig. 5. Humidity change

Таблица 1. Критерий Кохрена

Table 1. The Kohren criterion

№ опыта	$G_{jв}$	$G_{jз}$	$G_{jн}$	$G_{jи}$	$G_{jт}$
1	$0,29 \cdot 10^{-4}$	$0,29 \cdot 10^{-5}$	0,32	0,24	0,32
2	$0,24 \cdot 10^{-4}$	$0,23 \cdot 10^{-5}$	0,3	0,32	0,4
3	$0,29 \cdot 10^{-4}$	$0,29 \cdot 10^{-5}$	0,28	0,22	0,28
4	$0,27 \cdot 10^{-4}$	$0,35 \cdot 10^{-5}$	0,27	0,39	0,22
5	$0,24 \cdot 10^{-4}$	0,2	0,31	0,22	0,27

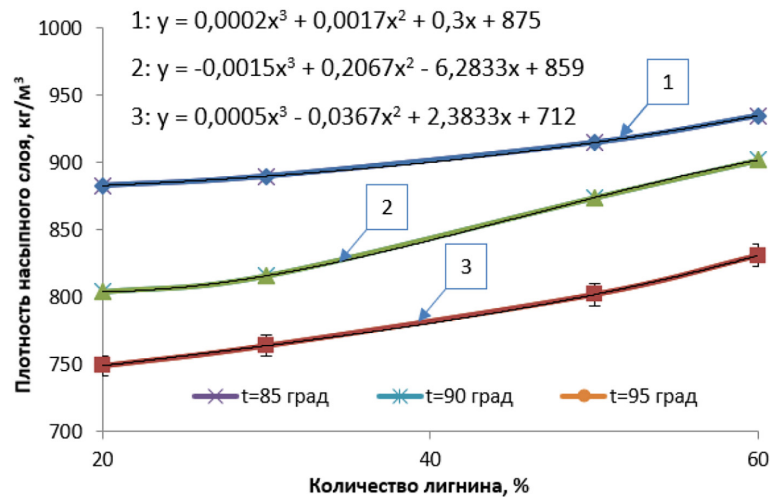


Рис. 6. Изменение плотности насыпного слоя

Fig. 6. Changing the density of the bulk layer

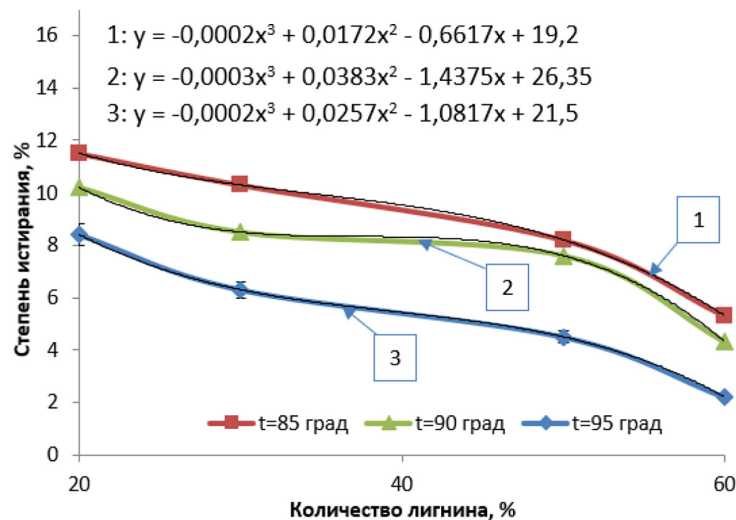


Рис. 7. Изменение степени истирания

Fig. 7. Changing the degree of abrasion

Выполнение условия минимального количества опытов, которое обеспечивает заданную точность результатов измерений, проверим с помощью критерия Стьюдента (табл. 2).

Критическое значение критерия Кохрена $G_T = 0,4075$. Поскольку $G < G_T$, то делаем вывод об однородности дисперсии. Следовательно, подтверждается гипотеза о нормальном законе распределения ошибок отдельных опытов и возможно применить регрессионный анализ (табл. 3).

Значимость коэффициентов регрессии проверим с помощью t -критерия Стьюдента (табл. 4).

Таблица 2. Максимальное среднеквадратическое отклонение

Table 2. Maximum standard deviation

№ опыта	$S_{jвmax} = S_{jв}$	$S_{jзmax} = S_{jз}$	$S_{jнmax} = S_{jн}$	$S_{jиmax} = S_{jи}$	$S_{jтmax} = S_{jт}$
1	0,021	0,012	21,007	0,673	0,066
2	0,025	0,009	29,389	0,8	0,036
3	0,03	0,012	21,035	0,417	0,036
4	0,024	0,015	21,112	0,882	0,033
5	0,022	0,036	15,274	0,424	0,034

Таблица 3. Ошибка всего эксперимента

Table 3. The error of the whole experiment

№ опыта	$S_{jв}$	$S_{jз}$	$S_{jн}$	$S_{jи}$	$S_{jт}$
1	0,0034	0,002	3,296	0,122	0,0079
2	0,0045	0,0016	4,774	0,126	0,0033
3	0,005	0,002	3,586	0,077	0,0053
4	0,004	0,0023	3,635	0,11	0,006
5	0,004	0,0062	2,453	0,077	0,0054

Таблица 4. Ошибки коэффициентов в уравнении регрессии

Table 4. Coefficient errors in the regression equation

№ опыта	$S_{bв}$	$S_{bз}$	$S_{bн}$	$S_{bи}$	$S_{bт}$
1	0,000136	0,00008	0,13184	0,00488	0,000316
2	0,00018	0,000064	0,19096	0,00504	0,000132
3	0,0002	0,00008	0,14344	0,00308	0,000212
4	0,00016	0,000092	0,1454	0,0044	0,00024
5	0,00016	0,000248	0,09812	0,00308	0,000216

Заключение

В статье изложены основные результаты исследования физических параметров топливных пеллет из неликвидной древесины, таких как теплота сгорания, влажность, степень истирания, плотность насыпного слоя и зольность в зависимости от процентного содержания лигнина в исходном сырье и температуры прессования.

В ходе экспериментальных исследований был выявлен рациональный технологический режим производства топливных пеллет из неликвидной древесины, которые будут соответствовать существующим стандартам к качеству гранул: содержание лигнина в исходном сырье

должно быть не менее 20 %; температура прессования составляет 95 °С; влажность сырья – 10 %; время прессования – 0,4 с; давление прессования – 300 бар.

По полученным данным можно сделать следующие выводы.

1. Энергия (теплота), получаемая при сгорании, является одним из важных параметров, определяющих качество пеллет. Чем больше этот показатель, тем качественнее и дороже продукт. В полученных пеллетах из неликвидной древесины она составляет 20,874 МДж/кг.

2. Зольность пеллет указывает на содержание в них минеральных веществ и различных примесей. Высокий показатель зольности снижает эффективность сгорания пеллет, приводит к образованию отложений в топке котла, увеличивает частоту чистки и обслуживания оборудования. Зольность пеллет из неликвидной древесины – 2,421 %.

3. Увеличение влажности исходного сырья выше 8–10 % негативно влияет на плотность, степень истирания и зольность пеллет. Однако при влажности менее 8 % после процесса гранулирования пеллеты не сохраняют свою форму и крошатся. Влажность пеллет из неликвидной древесины – 9,0 %.

4. Увеличение плотности пеллет с сохранением их длины и диаметра приводит к росту плотности насыпного слоя, что позволяет более эффективно перевозить гранулы за счет увеличения заполняемости транспортного средства. Плотность насыпного слоя пеллет из неликвидной древесины составила 721 кг/м³.

5. Увеличение степени истирания пеллет приводит к уменьшению их механической прочности. Механическая прочность важна при хранении и транспортировке пеллет. Из-за высокого давления, которое испытывают нижние слои, пеллеты крошатся и образуют пылевидную фракцию. Это ухудшает внешний вид пеллет и снижает их энергоэффективность как топлива. Степень истирания пеллет из неликвидной древесины равна 12,86 %.

С помощью расчетов было установлено, что количество проведенных опытов обеспечивает заданную точность результатов измерений.

Список литературы/ References

- [1] Сафиуллина А.Х., Кайнов П.А. Сравнительный анализ теплофизических свойств пеллет различных производителей. *Актуальные проблемы лесного комплекса*, 2019, 55, 184–188. [Safiullina A. Kh., Kaynov P. A. Comparative analysis of thermophysical properties of pellets from different manufacturers. *Actual problems of the forest complex*, 2019, 55, 184–188 (in Russian)]
- [2] Зотова Е.В., Сафонов А.О. Анализ методик оценки физико-механических и тепловых характеристик древесных пеллет. *Лесотехнический журнал*, 2014, 1(13), 113–126. [Zotova E. V., Safonov A. O. Analysis of methods for assessing the physical, mechanical and thermal characteristics of wood pellets. *Forest Engineering Journal*, 2014, 1(13), 113–126 (in Russian)]
- [3] Nielsen N. P. K., Gardner D., Poulsen T., Felby C. Importance of temperature, moisture content, and species for the conversion process of wood residues into fuel pellets. *Wood and Fiber Science*, 2009, 41(4), 414–425.
- [4] Holm J.K., Henriksen U.B., Hustad J.E. Toward an understanding of controlling parameters in softwood and hardwood pellets production. *Energy and Fuels*, 2006, 20(6), 2686–2694.

- [5] Matúš M., Križan P. Influence of structural parameters in compacting process on quality of biomass pressing. *Journal of Applied Mathematics*, 2010, 3 (3), 87–96.
- [6] Matúš M., Križan P. Modularity of pressing tools for screw press production solid biofuels. *Acta Polytechnica*, 2012, 52(3), 71–76.
- [7] Krizan P., Soos L., Vukelic Dj. Counter pressure effecting on compacted briquette in pressing chamber. *Journal of Production Engineering*, 2010, 12(1), 63–66.
- [8] Мюллер О.Д., Мелехов В.И., Любов В.К., Тюрикова Т.В. Математическая модель процесса формирования древесных гранул. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*, 2015, 2(344), 104–122. [Müller O.D., Melekhov V.I., Lyubov V.K., Tyurikova T.V. Mathematical model of the process of formation of wood granules. *News of higher educational institutions. Forestry magazine*, 2015, 2(344), 104–122 (in Russian)]
- [9] Holm J.K., Henriksen U.B., Wand K., Hustad J.E., Posselt D. Experimental verification of novel pellet model using a single pelleter unit. *Energy Fuel*, 2007, 21, 2446–2449.
- [10] Ванин С.И. *Гниль дерева, ее причины и меры борьбы*. Москва–Ленинград, 1931. 155 с. [Vanin S.I. *Wood rot, its causes and control measures*, Moscow-Leningrad, 1931, 155 p. (in Russian)]
- [11] Онучин Е.М., Медяков А.А., Сидорова Е.Н. Патент 178777 Российская Федерация, МПК В 02С 21/00. *Устройство для производства пеллет и гранул*: 2017127887: заявл. 03.08.2017: опубл. 19.04.2018; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный технологический университет». [Onuchin E. M., Medyakov A. A., Sidorova E. N. Patent 178777 Russian Federation, IPC В 02С 21/00. *Device for the production of pellets and granules*: 2017127887: application 03.08.2017: published 19.04.2018; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Volga Region State Technological University” (in Russian)]
- [12] Onuchin E., Medyakov A., Grunin L., Sidorova E. A study of the structure of wood damaged by rot using nuclear magnetic resonance. *Journal of Applied Engineering Science*, 2018, 16(2), 258–262.
- [13] Сидорова Е.Н., Онучин Е.М. Математическое моделирование процесса производства пеллет из пораженного гнилью древесного сырья. *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование*, 2020, 2(46), 54–67. [Sidorova E. N., Onuchin E. M. Mathematical modeling of the pellet production process from rotten wood raw materials. *Bulletin of the Volga Region State Technological University. Series: Forest Ecology. Nature Management*, 2020, 2(46), 54–67 (in Russian)]
- [14] Романовский В.И. *Основные задачи теории ошибок*. Москва–Ленинград: ГИТТЛ, 1947. 115 с. [Romanovsky V.I. *The main tasks of the theory of errors*. Moscow–Leningrad, GITTL, 1947, 115 p. (in Russian)]

Theoretical and Applied Heat Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: RUVMPW

УДК 551.521.37

**The Effect of the Second Law of Thermodynamics
in Technical Systems**

Nikolay V. Tsuglenok*

*ANO “Research and Production Center
of Biosphere-Technological Energy of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences”
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 11.06.2026, received in revised form 01.07.2026, accepted 15.07.2026

Abstract. The purpose of this paper is to examine the movement and practical use of various types of energy in technical systems and to analyze the effect of the second law of thermodynamics in specific physical processes involving the movement of low and high temperatures, kinetic and quantum energies in media and bodies in various technical systems.

Keywords: law of thermodynamics, technical devices, energy sources, Stirling engine, energy movement in technical systems.

Citation: Tsuglenok N. V. The Effect of the Second Law of Thermodynamics in Technical Systems. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(6), 761–767. EDN: RUVMPW



**Действие формулировки второго закона термодинамики
в технических системах**

Н. В. Цугленок

*АНО «НОПЦ Биосферно-технологической
энергетики СО РАН»
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. Цель работы – рассмотреть движение и практическое использование различных видов энергии в технических системах и дать анализ действия формулировки второго закона термодинамики

© 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: ntsuglenok@mail.ru

в конкретных физических процессах движения низких и высоких температур и кинетической, потенциальной и квантовой энергии в средах и телах в различных технических системах.

Ключевые слова: закон термодинамики, технические устройства, источники энергии, двигатель Стирлинга, движение энергии, технические системы, давление.

Цитирование: Цугленок Н. В. Действие формулировки второго закона термодинамики в технических системах / Н. В. Цугленок // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(6). С. 761–767. EDN: RU VMPW

Второй закон термодинамики сформулировал Роберт Клаузиус в 1850 г., опираясь не на собственные исследования, а на существующие работы других ученых и на циклическую теорию Санди Карно, разработанную в 1825 г., о круговом движении тепла и холода в цилиндре. С помощью рабочего газового тела под действием разности температурных потенциалов двух резервуаров теплота переходит от нагревателя к холодильнику, а в обратном цикле – перенос тепла происходит от холодного тела к горячему за счет внешнего источника, в данном случае теплового насоса в виде цилиндра в двигателе Стирлинга, создавшего тепловой двигатель, названный в дальнейшем двигателем Стирлинга, на который 27 сентября 1816 г. он получил английский патент № 40811819. Эта теория подтверждает, что обмен энергией между телами не односторонний и идет возвратно поступательно и циклически во многих технических системах, без использования дополнительных источников энергии, что явно противоречит второму закону термодинамики [1].

В настоящее время двигатели Стирлинга применяются в различных сферах, способных работать на разных низкотемпературных и высокотемпературных источниках тепла, в первую очередь на дизельных подводных лодках, без их всплытия, для пополнения запасов воздуха. Такие двигатели установлены на шведских лодках НАРП «Голланд» и «Викинг», французских «Сага 1» и «Сага 2», японских «Хирусио». НАСА. Их используют на космических кораблях и солнечных электростанциях. В России разрабатывается проект замены паровых турбин атомных станций на двигатели Стирлинга. Они уже выпускаются для туристов для автономного получения электрической и тепловой энергии в отсутствие централизованных источников энергии, применяются также для автономного тепло- и электроснабжения фермерских поселений и во многих других сферах.

Несмотря на работы Стирлинга, Клаузиус ввел понятие внутренней энергии системы в физику и дал формулировку второму началу и второму закону термодинамики со следующей формулировкой: «тепло никогда не может перейти от более холодного тела к более тепловому, без одновременного изменения, связанного с этим переходом».

Очевидно, что Клаузиус виртуально подразумевал, что этот переход возможен с одновременным изменением условий такого перехода, и формулировка второго закона термодинамики была написана на конкретную работу только идеальных тепловых двигателей. Далее Клаузиус утверждал, что коэффициент полезного действия (КПД) в технических системах (тепловом двигателе) не может быть больше единицы. И это утверждение стало незыблемым даже для всех устройств, работающих на других принципах.

Так появилась термодинамика – эмпирическая наука об основных способах преобразования и движения внутренней энергии в телах для совершения механической работы.

Но в те времена никто не отметил, что при отключении и остановке любой тепловой машины наблюдается обратное движение особенно зимних температур в тело двигателя, когда

граница теплообмена с преобладающей разностью низких температур низкотемпературным потоком квантовой энергии перемещается в обратном направлении.

Историки пишут о том, что Клаузиус, сидя за чашкой чая, наблюдал, как он остывает при передаче тепловой энергии в окружающее пространство комнаты. Если бы Клаузиус провел элементарный эксперимент – вылил бы из чашки кипящий чай и затем налил бы в нее очень холодную воду, он в своих ладонях через минуту почувствовал бы холод, который быстро поглощает тепло из внутренней стенки кружки и перемещается к наружной стенке. Это наблюдение он почему-то не провел и не проверил обратное движение холодного потока квантовой энергии в горячую стенку чашки. Конечно, в этом случае он, возможно, и не стал бы таким образом формулировать второй закон термодинамики при одностороннем движении тепловой энергии от одного тела к другому.

К сожалению, при дополнительном накоплении знаний и практических примеров в технологических процессах перехода энергии от менее нагретых сред и тел к более нагретым формулировка второго закона термодинамики физиками была урезана и изложена вообще в упрощенной формулировке: «энергия не может самопроизвольно переходить от тела менее нагретого к более нагретому».

Непонятно, какая это энергия? Если, тепловая-кинетическая, то это может быть только при преобладающей величине более высокой температуры тела над другой. Но другие виды энергии: квантовая, потенциальная, ядерная электронная, протонная, электрическая, магнитная, электронно-ионная, химическая, осмотическая, механическая, гравитационная и т.д., могут переходить от тела к телу независимо от движения тепловой-кинетической энергии. Необходимо отметить, что самопроизвольное движение любой энергии от тела, менее нагретого, к телу, более нагретому, и наоборот, не возможно.

Любой вид энергии от тела к телу может переходить только при наличии действия теплового напряжения, создаваемого преобладающей разностью температурных или энергетических потенциалов или доминирующей величиной других видов энергии до наступления энергетического или теплового равновесия между телами. По нашему мнению, понятие формулировки второго закона современными физиками, претендующего на общий закон термодинамики, сокращенный и изложенный в виде «энергия не может самопроизвольно переходить от тела менее нагретого к более нагретому», характеризует одностороннее движение тепловой кинетической энергии. Это очевидно и, по нашему мнению, не корректно и не отражает общее возвратно-поступательное движение энергий в средах и телах.

Формулировка даже не предполагает, как двигаются энергии по пока не известному общему закону термодинамики в природных и технических термодинамических системах при возвратно-поступательном движении тепла, холода и при различных дополнительных видах энергии.

Поэтому действующая укороченная формулировка второго закона термодинамики с понятием «самопроизвольное движение энергии от тела менее нагретого к более нагретому не возможно» противодействует созданию общей теории и достоверной формулировки основного закона термодинамики, отражающего реальное возвратно-поступательное движение энергии в средах и телах при различных энергетических воздействиях и, соответственно, передачи тепла и холода в большинстве природных и технических системах.

В связи с этим назрела необходимость рассмотреть и провести анализ соответствия формулировки второго закона термодинамики известным физическим явлениям движения тепла или холода и других видов энергии в окружающих средах и телах и технических термодинамических системах.

Мы провели такой анализ работ ряда ученых, начиная с нашего знаменитого русского ученого М. В. Ломоносова, который правильно исключил существовавшее ранее понятие теплорода, подтвердил и доказал, что причиной теплоты является внутреннее движение связанной материи, что полностью соответствует физике Ньютона. Но, к сожалению, в этой формулировке, почему-то отсутствует понятие, какими силами или энергиями организовано это движение связанной материи в средах и телах и почему любая система при прекращении действия каких-то сил или энергий приходит в состояние постоянного равновесия и покоя [2].

Далее Кельвин систематизировал знания и ввел понятия энтропии и абсолютной температуры. Французский ученый Луи де Бройль в 1923 г. предложил внутреннюю энергию движения энергии считать виртуально корпускулярно-волновым взаимодействием и дуализмом.

Понятие энтропии к формулировке второго закона применил Людвиг Больцман: «Энтропия замкнутой системы либо увеличивается, либо остается постоянной». Энтропия в любой системе стремится к максимуму.

В 1940-х годах Роберт Майер и Прескотт Джоуль сформулировали универсальный закон сохранения и превращения энергии,

Идеи Лео Сцилларда, Рольфа Ландауэра, в том числе в 1982 г. Чарльза Беннета, наверное, выражают основную фундаментальную задачу современной науки – ключевых основ мироздания – энергии и информации [3].

Более ранние работы Людвиг Больцмана и эксперимент Джеймса Максвелла на факте работы технической термодинамической системы, представляющей сосуд, разделенный перегородкой на две части, имеющей отверстие с устройством, которое позволяет пролетать быстрым (горячим) молекулам газа только из первой части сосуда во вторую, а медленным (холодным) молекулам из второй части в первую. Таким образом, этот процесс, якобы позволяющий самопроизвольно нагреть вторую часть сосуда и охладить первую за счет возвратно-поступательного движения энергии, основанной на разности температурных потенциалов среды, без дополнительного подвода энергии, получил название «Демон Максвелла».

Аналогичные физические явления наблюдаются и в механических тепловых насосах, кондиционерах и холодильниках, работающих практически во всех странах мирового пространства, передающих энергию третьими телами, перемещаемых в этих системах мотор-компрессорами, которые давлением и вакуумом обеспечивают возвратно-поступательное, циклическое перемещение тепла и холода от более холодных тел к горячим и наоборот.

Газообразный фреон с низкой температурой кипения до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ посредством мотор-компрессора из испарителя, погруженного в земные низкотемпературные источники энергии $5\text{--}8\text{ }^{\circ}\text{C}$ – воды, грунта, воздуха, извлекает и передает некоторую часть плюсовой тепловой энергии газообразному фреону, который мотор-компрессором передается в конденсатор, после которого установлен пружинный дроссель, позволяющий компрессору создавать высокое давление в конденсаторе и некоторый вакуум в испарителе. В конденсаторе низкотемпературные

пары фреона конденсируются в жидкую фракцию с повышением его температуры до 50–60 °C и ее передачей контактным способом потребителям или другим телам. КПД этих процессов равно 4, что в четыре раза и более выше КПД теплового двигателя, который не может быть больше единицы.

В настоящее время в Красноярске разработана новая термоэлектрическая схема работы теплового насоса, которая исключает в тепловом насосе еще и дроссель – пассивный конструктивный элемент, создающий перепад давления рабочего тела между конденсатором и испарителем. В такой схеме вместо дросселя устанавливается турбина турбоэлектрогенератора, создающего сопротивление подаче фреона из конденсатора в испаритель компрессором с высокой температурой до 50 °C и высоким давлением до 25 атм. Турбина высокооборотистого электрогенератора вращается под действием давления жидкого фреона и вырабатывает электрическую энергию как минимум с КПД не менее 50 %. Тепловой коэффициент использования энергии или трансформации энергии в таких электротермических системах, по сравнению с КПД теплового двигателя, всегда больше единицы и находится в пределах 4–7 [2].

Работы немецкого физика Томаса Иоганна Зеебека, выполненные в 1821 г. с изобретением термопары, также отличались от формулировки второго закона термодинамики при открытии им термоэлектрического эффекта. Термопара, спаянная из двух разных металлов, являлась источником тока. Она «самопроизвольно» извлекала электрическую энергию разностью температурных потенциалов при тепловом напряжении между двумя средами или телами и обеспечивала движение электронов от более высоких температурных потенциалов к низким, от плюса к минусу, а во внешней замкнутой сети электрическая энергия передавалась обратным движением электронов во внешнюю сеть от более холодного минуса термопары к более теплему плюсу.

В 1942 г. известный русский ученый, академик Абрам Федорович Иоффе, продолжил работу Томаса Зеебека и заложил основы полупроводниковой термоэлектрической энергетики. Он использовал в термопарах не спай разнородных металлов, а спай полупроводников, которые позволяли увеличить КПД генератора и уменьшить разницу температур между нагреваемой и охлаждаемой средами [4].

Такие термоэлектрические генераторы, работающие на разности потенциалов теплового напряжения между телами, впервые выпускались в осажденном Ленинграде и Правдинском опытным заводом источников тока в Пушкинском районе Московской области для зарядки аккумуляторных батарей в партизанских отрядах и в разведгруппах на фронтах [4]. Впоследствии они выпускались для питания коротковолновых радиостанций «Урожай» и поставлялись на экспорт.

В 2015 г. физики из Финляндии, США и России (Иван Хаймович из Института физики микроструктур Российской академии наук) создали модель, основанную на работе одноэлектронного транзистора, с небольшим медным островом, подключенным к двум сверхпроводящим алюминиевым выводам. Когда частица находится на острове, медный остров транзистора притягивает ее положительным зарядом. Если электрон покидает остров, он отталкивается при помощи отрицательного заряда, что приводит к понижению температуры в системе [5].

Аналогичный опыт проводился учеными и с жидкостями. В случае заполнения сосуда, разделенного проницаемой lenta-перегородкой, в одной части холодной водой, в другой ча-

сти более теплым водным солевым раствором, одинаковые по объему заполнения, но разные по массе за счет концентрированного раствора во второй части сосуда, преобладающим действием энергии осмотических сил, более холодная вода с более низкой температурой из первой части сосуда через влагонепроницаемую перегородку под действием энергии осмотических сил вроде бы «произвольно» переходит во вторую часть сосуда в более теплый солевой раствор, охлаждая его.

На построенной электрической станции в Фукуоке японские инженеры по одну сторону мембраны в емкости пропускали пресную холодную воду из обычного горного ручья, так же как и в описанном эксперименте, а по другую – морскую. Более холодная вода ручья, стремясь к выравниванию концентрации солевого раствора и массы в обеих частях емкостей, переходит через мембрану к соленому более теплomu раствору морской воды, повышает ее объем в емкости, которая за счет увеличенной ее высоты при ее подаче на крыльчатку вращает турбину. Данная осмотическая электростанция мощностью 100 кВт, построенная и запущенная в 2025 г., вырабатывает 880 000 кВт*ч электрической энергии в год.

Ученые в г. Новосибирске предложили технологию производства тепловой энергии, эффективность которой растет пропорционально снижению температуры холода в земной атмосфере. Так родился проект «ТепХол» – «Тепло из Холода» [6].

В качестве эффективного материала ученые синтезировали композит на основе силикагеля со специальными солями, который значительно превосходит по характеристикам обычный активированный уголь, в качестве рабочего тела используется не фреон или аммиак, а пары обычного метанола.

Холодный жидкий метанол подается в емкость, где нагревается контактным способом всего на несколько градусов незамерзающей воды из реки, озера или скважины (около 0–5 °С). Нагретый метанол при этом испаряется, и его пары адсорбируются специально созданным пористым материалом – адсорбентом – с выделением значительного количества тепла – до 40–60 °С, которого уже достаточно для его передачи в системы отопления теплых полов или радиаторов, отапливающих квартиры или здания. Достаточно 10 кг специального адсорбента, который будет отапливать дом и прослужит не менее пяти лет.

Проведенный анализ работ по возвратно-поступательному движению тепла и холода между средами и телами или энергией третьих тел в специальных технических устройствах демонстрирует не «самопроизвольное», а возвратно-поступательное движение тепла и холода между телами, преобладающее действие высоких или низких температур или третьих тел и дополнительных источников энергии – электронных, электрических, осмотических, гравитационных, абсорбционных вакуумных и т.д.

Эти приведенные термодинамические процессы противоречат формулировке второго закона термодинамики, придуманной Клаузиусом для идеальных тепловых двигателей, который нельзя рассматривать как основной закон термодинамики, действующий в технических и природных термодинамических системах.

В связи с этими неопровержимыми данными для идеальных тепловых машин и других технических термодинамических систем, отличных от работы идеальных тепловых двигателей, напрашивается и подходит более реальная и справедливая формулировка основного закона термодинамики: «реверсивное движение энергий и границ теплообмена в средах и телах

невозможно без действия преобладающих градиентов низких или высоких температур или других источников энергии».

Данная формулировка объединяет два противоположных первоначальных мнения Роберта Клаузиуса и экспериментов Стирлинга и Джеймса Максвелла и результатов исследований других современных ученых и, по нашему мнению, адекватно отражает движение тепловой энергии в технических термодинамических системах, работающих с использованием разных тепловых источников энергии, вызывающих возникновение и перемещение различных видов внутренней энергии между телами, находящимися в различных окружающих средах.

Список литературы / References

- [1] <https://ru.wikipedia.org/wiki/>
- [2] Баякин С.Г., Цугленок Н.В., Пьяных Т.А. Второй закон термодинамики в актуальном изложении и перспектива низкотемпературной энергогенерации. *Журнал СФУ. Техника и технологии*. 2026. 19(2). 172–181 [Bayakin S.G., Tsuglenok N.V., P'yanykh T.A. The second law of thermodynamics in an up-to-date presentation and the prospects for low-temperature power generation. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technology*. 2026. 19(2). 172–181 (in Russian)]
- [3] <https://web.archive.org/web/20191128134426/http://ru.wikipedia.org/wiki/>
- [4] <https://yoomoney.ru/to/410018926235150>
- [5] <https://ru/news/2016/01/13/demon/?ysclid=mgezxxah6be>
- [6] 907887577 (<https://prochepetsk.ru/news/63875>).

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

EDN: LJERVQ

УДК 621.365.51:669.715

**Experimental Study
of a Prototype Induction Channel Heater
for Molten Aluminum**

**Aleksei S. Timofeev^{a,*},
Viktor N. Timofeev^{a, b}, Maksim Yu. Khatsayuk^{a, b},
Eduard R. Vinter^{a, b} and Ivan V. Kizhaev^{a, b}**

^aSiberian Federal University

Krasnoyarsk, Russian Federation

*^bResearch and Production Center for Magnetohydrodynamics
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 21.03.2026, received in revised form 14.05.2026, accepted 15.07.2026

Abstract. The paper presents a prototype of an open-type induction channel heater designed for maintaining the temperature of molten aluminum. The feasibility of induction heating of molten aluminum in an open horizontal channel without critical deformation of the free surface or the occurrence of a pinch effect has been experimentally confirmed. The results of experimental investigations are presented, including measurements of overheating temperature, heating rate, and heat losses through the casing. It was established that the average heating rate within the temperature range of 701–735 °C is 5.4 °C/min, making it possible to compensate for heat losses during metal transportation and to provide additional heating of the melt directly during the casting process. The combination of the proposed method with conventional control algorithms enables precise temperature regulation with an accuracy of 1–3 °C, which is critically important for the production of high-performance aluminum alloys, where maintaining a narrow temperature range determines the stability of the microstructure and the properties of the final product.

Keywords: induction heating, magnetohydrodynamics, molten aluminum, temperature maintenance, casting trough, automatic control system, heating rate, out-of-furnace processing, aluminum heating.

Acknowledgements. The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 26–29–20071, <https://rscf.ru/project/26–29–20071/>, at the expense of targeted financing (grant) of the Krasnoyarsk Regional Science Foundation.

© 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: alexey1999bittok@gmail.com

Citation: Timofeev A. S., Timofeev V. N., Khatsayuk M. Yu., Vinter E. R., Kizhaev I. V. Experimental Study of a Prototype Induction Channel Heater for Molten Aluminum. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(6), 768–778. EDN: LJERVQ



Экспериментальные исследования прототипа индукционного канального нагревателя для алюминиевого расплава

А. С. Тимофеев^а, В. Н. Тимофеев^{а, б},
М. Ю. Хацаюк^{а, б}, Э. Р. Винтер^{а, б}, И. В. Кизжаев^{а, б}

^а Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск

^б Научно-производственный центр магнитной гидродинамики
Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. В работе представлен прототип индукционного канального нагревателя открытого типа для поддержания температуры алюминиевого расплава. Экспериментально подтверждена возможность индукционного нагрева расплава алюминия в открытом горизонтальном канале без критических деформаций свободной поверхности и пинч-эффекта. Приведены результаты экспериментальных испытаний, включающие измерения температуры перегрева, скорости нагрева и тепловых потерь через кожух. Установлено, что средняя скорость нагрева в диапазоне температур 701–735 °C составляет 5,4 °C/мин, что позволяет компенсировать тепловые потери при транспортировке и осуществлять дополнительный подогрев расплава непосредственно в процессе литья. Сочетание предложенного метода со стандартными алгоритмами регулирования обеспечивает прецизионное поддержание температуры с точностью 1–3 °C, что критически важно для получения алюминиевых сплавов ответственного назначения, где соблюдение узкого температурного интервала определяет стабильность структуры и свойств готовой продукции.

Ключевые слова: индукционный нагрев, магнитная гидродинамика, алюминиевый расплав, поддержание температуры, литейный желоб, автоматическая система управления, скорость нагрева, внепечная обработка, нагрев алюминия.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26–29–20071, <https://rscf.ru/project/26–29–20071/>, за счет целевого финансирования (гранта) Красноярского краевого фонда науки.

Цитирование: Тимофеев А. С. Экспериментальные исследования прототипа индукционного канального нагревателя для алюминиевого расплава / А. С. Тимофеев, В. Н. Тимофеев, М. Ю. Хацаюк, Э. Р. Винтер, И. В. Кизжаев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(6). С. 768–778. EDN: LJERVQ

Введение

Одной из важнейших задач в плавно-литейном производстве алюминиевой продукции с учетом современных требований и условий к производству металлов и сплавов является поддержание температуры жидкого металла [1]. При транспортировке и обработке алюминиевого расплава по литейному желобу и сопутствующем осуществлении внепечных технологических

операций в металлургических агрегатах температура расплава может значительно снижаться, что негативно сказывается на качестве получаемых слитков [1, 2].

Традиционные устройства компенсации тепловых потерь, основанные на применении резистивного и конвективного нагрева, имеют ограниченный ресурс, низкую плотность мощности, высокую инерционность и требуют холостого пролива металла.

Аналогичная проблема возникает при использовании устройств обработки, в которых процесс нагрева и поддержания температуры основан на применении радиационных нагревателей (дегазаторы, фильтровальные камеры), имеющих ограниченный ресурс работоспособности не более 5–6 месяцев [3]. При этом агрегаты оснащаются не менее чем тремя нагревателями на камеру.

Особенно остро проблема проявляется при модернизации цеха и в технологиях с узким допустимым диапазоном температуры металла. При увеличении расстояния от печи до литейной машины требуется большее количество устройств нагрева, чтобы скомпенсировать потери температуры расплава. Это приводит к повышению не только стоимости оборудования, но и риска загрязнения расплава при старении и разрушении нагревателей. А ввиду невозможности точного контроля нагрева конечная температура расплава может принимать значения в очень широком диапазоне.

Таким образом, используемые на текущий момент методы поддержания температуры расплава хоть и решают проблему остывания, но также имеют ряд серьезных недостатков. В качестве альтернативы описанным способам перспективным методом является использование системы индукционного нагрева канального типа открытого исполнения [4]. В отличие от известных решений, данное устройство способно точно управлять температурой расплава в автоматическом режиме, не имеет возможности загрязнения расплава и имеет высокий КПД. Из преимуществ данного решения также стоит отметить работу от стандартного напряжения, доступного повсеместно.

Однако, как известно, в электромагнитных системах с открытой поверхностью проводящей жидкости неизбежно возникает деформация этой поверхности (формирование мениска), обусловленная взаимодействием электромагнитного поля с межфазной границей «металл – воздух» [5–8]. Следовательно, выбор рабочих параметров устройства сводится к решению научной задачи, заключающейся в нахождении компромисса между требуемой интенсивностью нагрева и допустимой деформацией свободной поверхности жидкого металла. Теоретические исследования показывают, что такой компромисс возможен [9], однако на текущем этапе исследований экспериментального подтверждения возможности реализации данного метода нагрева получено не было.

Целью работы является экспериментальное исследование процесса нагрева расплава алюминия с использованием прототипа индукционного канального нагревателя.

Устройство и принцип работы установки

Общий вид прототипа индукционного канального нагревателя показан на рис. 1. Установка включает в себя огнеупорный желоб, размещаемый на металлической опорной раме, и индуктор, магнитопровод которого охватывает часть канала. Обмотка индуктора питается от однофазного лабораторного автотрансформатора (ЛАТР), на оси регулировочной ручки (то-

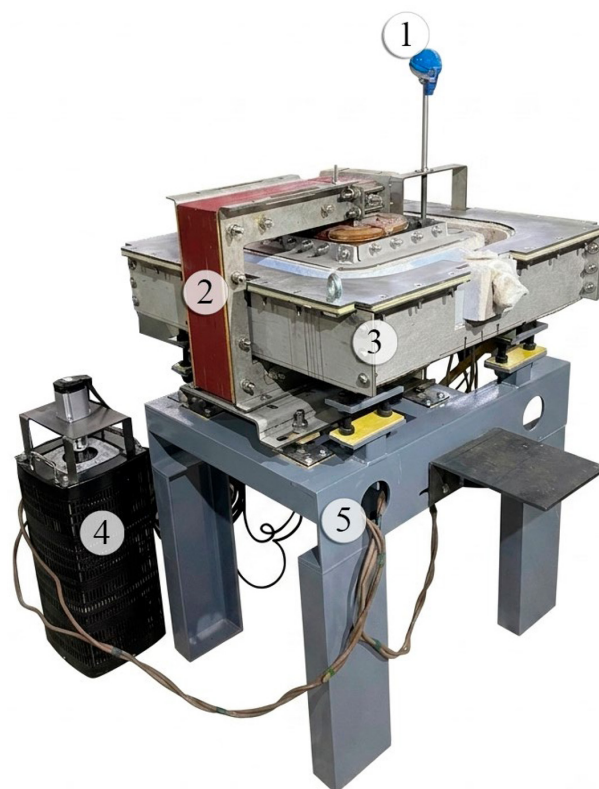


Рис. 1. Общий вид прототипа индукционного канального нагревателя: 1 – термопара в защитном чехле; 2 – индуктор; 3 – желоб; 4 – ЛАТР с управляющим сервоприводом; 5 – опорная рама

Fig. 1. General view of the induction duct heater prototype: 1 – thermocouple in a protective case; 2 – inductor; 3 – trough; 4 – laboratory autotransformer with a control servo drive; 5 – support frame

кошьемника) которого установлен серводвигатель, позволяющий осуществлять регулирование напряжения в автоматическом режиме.

Перед проведением испытаний осуществляется установка термопарных датчиков для измерения в процессе работы температуры расплава и обмотки индуктора. Термопара для измерения температуры расплава в желобе размещается на специально предусмотренном кронштейне и может дополнительно крепиться для обеспечения неподвижности (рис. 2а). Термопара для измерения температуры обмотки индуктора размещается в средней части обмотки и может размещаться как свободно без фиксации, так и с ее закреплением посредством термостойкого клея (рис. 2б).

Основными компонентами шкафа являются следующие модули автоматической системы управления (АСУ): сенсорный панельный контроллер (СПК), модуль дискретного ввода/вывода, модуль аналогового вывода, модуль аналогового ввода, блок питания, модуль измерения параметров электрической сети, трансформаторы тока и драйвер сервопривода. Кроме того, в шкафу установлены вспомогательные элементы, такие как автоматические выключатели, контакторы, твердотельное реле, контактные шины и другие компоненты.

Все компоненты размещаются в металлическом щите ЩМП-3-1, который оснащен дверцей для удобства обслуживания и доступа, крепятся на дин-рейке или фиксируются непосред-



Рис. 2. Размещение термопары в огнеупорном желобе (а) и на обмотке индуктора (б)

Fig. 2. Placement of the thermocouple in the refractory trough (a) and on the winding of the inductor (b)

ственно на стенке шкафа с помощью винтового соединения. На рис. 3 приведено изображение шкафа питания и управления в сборе.

На лицевой стороне дверцы расположены экран СПК, а также индикаторные лампы состояния системы, кнопки включения/отключения и управления, потенциометр для ручного управления мощностью, подаваемой на индуктор. На рис. 4 приведено назначение кнопок и индикаторов на лицевой панели шкафа.

Проведение испытаний устройства индукционного канального нагревателя

Для электропитания прототипа необходимо подключение к однофазной сети переменного тока частотой 50 Гц и напряжением 220 В. В качестве жидкого металла используется расплав алюминия.

Ниже приведены определяемые показатели в рамках проведения испытаний:

- потребляемая активная мощность прототипа, кВт;
- полная мощность, кВА;
- температура нагрева жидкого металла, °С;
- скорость нагрева расплава, °С/мин;
- температура перегрева жидкого металла ($T_{\text{кон}} - T_{\text{нач}}$), °С;
- температура обмотки индуктора, °С.

Определение полной мощности, потребляемой активной мощности, температуры нагрева жидкого металла и температуры обмотки индуктора осуществляется путем считывания данных истории работы автоматизированных средств контроля параметров прототипа из СПК.

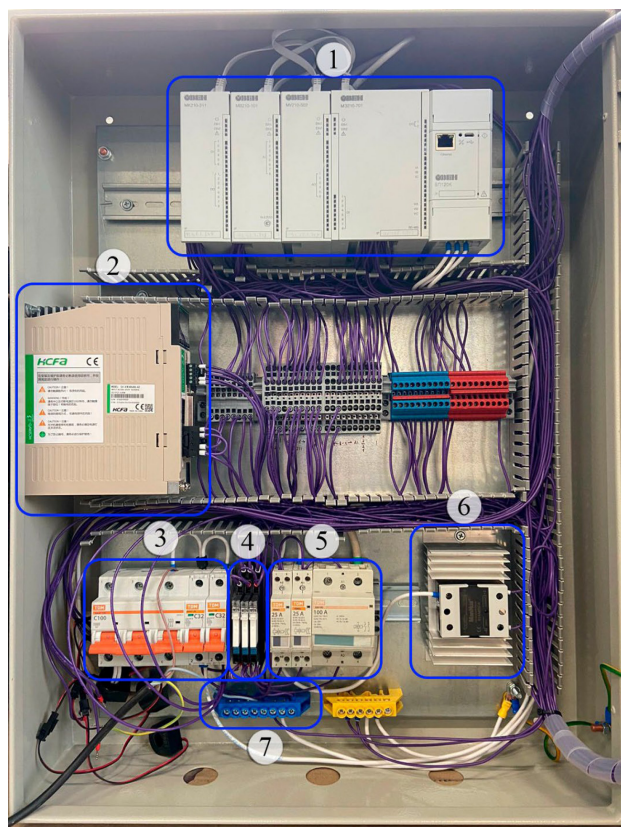


Рис. 3. Элементы шкафа питания и управления: 1 – модули АСУ; 2 – драйвер сервопривода; 3 – автоматические выключатели; 4 – промежуточные реле; 5 – контакторы; 6 – твердотельное реле; 7 – шина нулевая

Fig. 3. Elements of the power supply and control cabinet: 1 – automatic control system modules; 2 – servo driver; 3 – circuit breakers; 4 – intermediate relays; 5 – contactors; 6 – solid-state relay; 7 – neutral bus

Первым этапом в испытаниях прототипа индукционного нагревателя является его включение и проверка работоспособности. По итогам проведенных действий установлено, что все узлы и каналы системы управления работают исправно.

Следующим и основным этапом испытаний является загрузка жидкого металла в желоб огнеупорного канала, его нагрев до заданной температуры и поддержание необходимых параметров. Перед загрузкой жидкого металла бетонная часть и внутреннее пространство желоба огнеупорного канала прогреваются не менее чем до 650 °С. Ленточные каналы желоба перед загрузкой жидкого металла замуровываются огнеупорной ватой. Во время испытаний прогрев осуществлялся встроенным в огнеупорный канал керамическим нагревателем.

Сразу после загрузки жидкого металла осуществляется фиксация его температуры на сенсорном панельном контроллере для дальнейшего определения температуры перегрева и времени нагрева.

Температура перегрева $T_{overHeat}$ определяется как разница между конечной температурой нагрева $T_{кон}$, определяемой с помощью прототипа, и температурой загруженного жидкого металла в начальный момент времени $T_{нач}$.

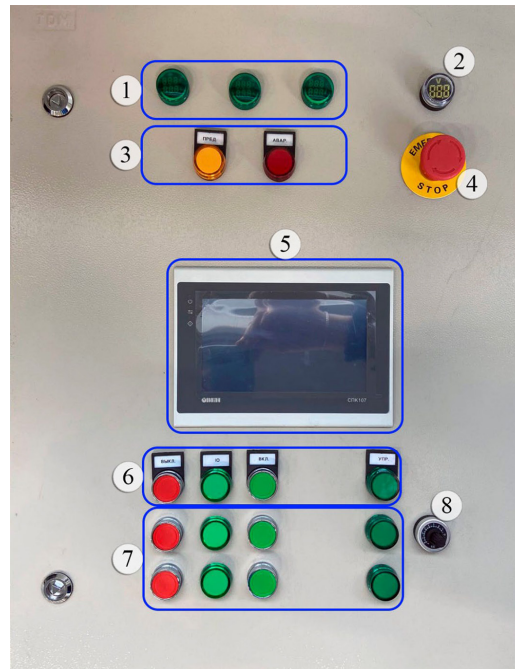


Рис. 4. Лицевая операторская панель шкафа: 1 – параметры сети U/I; 2 – питание модулей АСУ 24V; 3 – состояние системы; 4 – аварийное отключение 2SB 1; 5 – сенсорная панель СПК107; 6 – управление нагревателем; 7 – управление индуктором; 8 – потенциометр

Fig. 4. Front operator panel of the cabinet: 1 – U/I network parameters; 2–24V power supply for the ACS modules; 3 – system status; 4 – emergency shutdown 2SB 1; 5 – SPK107 touch panel; 6 – heater control; 7 – inductor control; 8 – potentiometer

$$T_{overHeat} = T_{кон} - T_{нач}. \quad (1)$$

Скорость нагрева расплава определяется как отношение температуры перегрева к времени нагрева.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_{кон} - T_{нач}}{t_{кон} - t_{нач}}. \quad (2)$$

После загрузки жидкого металла и измерения его температуры осуществляется включение нагрузки. Затем устанавливается необходимое значение температуры или мощности в режиме автоматического или ручного управления соответственно.

При проведении испытаний целевая температура по жидкому металлу была установлена на 735 °С. По итогам настройки первичных параметров сервопривод ЛАТРа занимает рабочее положение, соответствующее значению мощности, необходимой для нагрева до целевой температуры.

Начальная температура загруженного в желоб жидкого металла (расплава алюминия) составила 701 °С. На рис. 5 приведено изображение прототипа с жидким металлом, загруженным в огнеупорный желоб. Мощность, потребляемая индуктором в процессе нагрева, составила 2,7 кВт, а полная мощность – 3,9 кВт.

По месту испытаний температура перегрева определяется путем вычисления разности считанных с СПК значений температуры поддержания жидкого металла и температуры загруз-

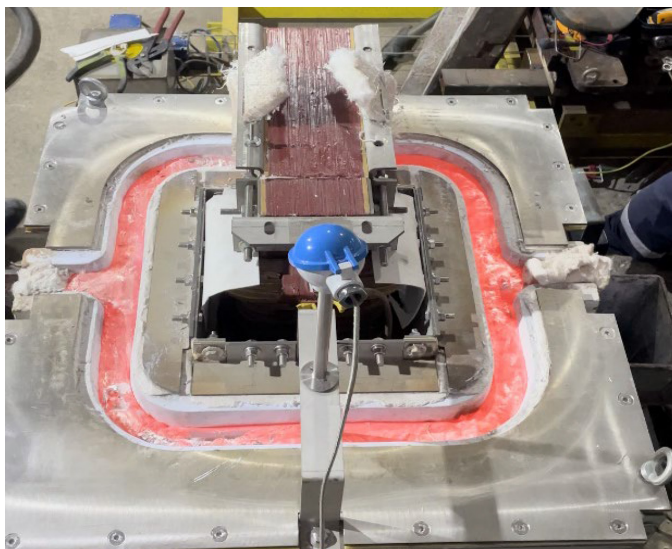


Рис. 5. Вид на огнеупорный канал с жидким металлом и параметры сети в процессе нагрева расплава

Fig. 5. View of the refractory channel with liquid metal and network parameters during melt heating

женного жидкого металла согласно формуле (1). Скорость нагрева определяется на основании времени от старта нагрева до достижения жидким металлом температуры поддержания согласно формуле (2). По месту испытаний данные показатели составили 34 °С для температуры перегрева жидкого металла и 5,5 °С/мин – для скорости нагрева.

На рис. 6 показана диаграмма процесса нагрева и поддержания температуры жидкого металла. Из показателей диаграммы видно, что при достижении установленной температуры значение мощности начинает колебаться, что обусловлено работой АСУ для поддержания температуры расплава с перерегулированием не более 1–3 °С.

Для определения точных показателей температуры перегрева и скорости нагрева необходимо провести анализ диаграммы температуры жидкого металла в процессе нагрева, которая была записана в процессе архивации. На рис. 6а виден участок процесса нагрева, крайние точки которого представляют собой начальные и конечные показатели для определения температуры перегрева и скорости нагрева. Участок диаграммы процесса нагрева отдельно показан на рис. 6б, из которого можно точно вычислить необходимые показатели.

Таким образом, температура перегрева составляет 33,13 °С.

Время процесса нагрева, согласно диаграмме, составляет 365 секунд, в результате скорость нагрева будет равна:

$$\frac{dT}{dt} = 0,09^\circ\text{C}/\text{сек или } 5,4^\circ\text{C}/\text{мин.}$$

Температура обмотки индуктора в процессе испытаний также определялась путем считывания показаний соответствующей термопары в СПК. Как видно из рис. 7, в процессе испытаний температура обмотки индуктора не превышала 45 °С, что также подтверждается диаграммой с архивации, которая показана на рис. 7.

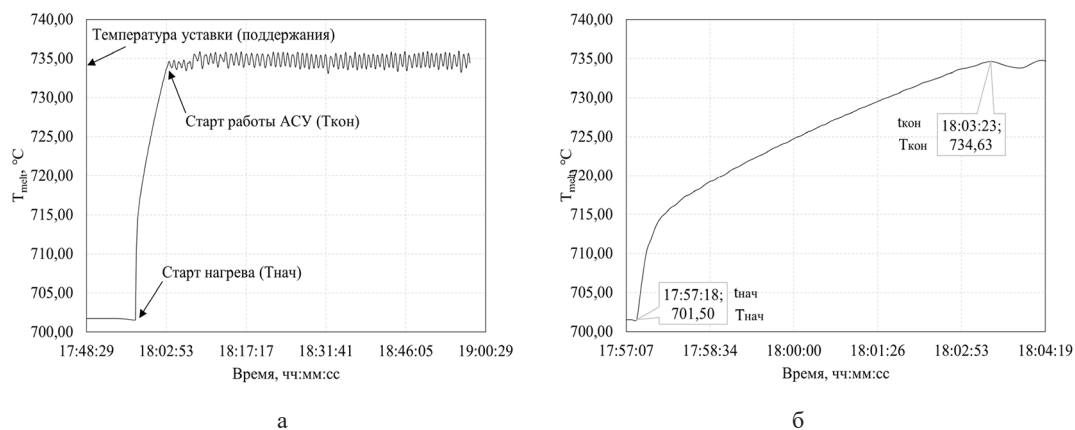


Рис. 6. График температуры жидкого металла в процессе нагрева и поддержания жидкого металла (а) и участок диаграммы в процессе нагрева жидкого металла (б)

Fig. 6. A graph of the temperature of liquid metal during heating and maintenance of liquid metal (a) and a section of the diagram during heating of liquid metal (b)

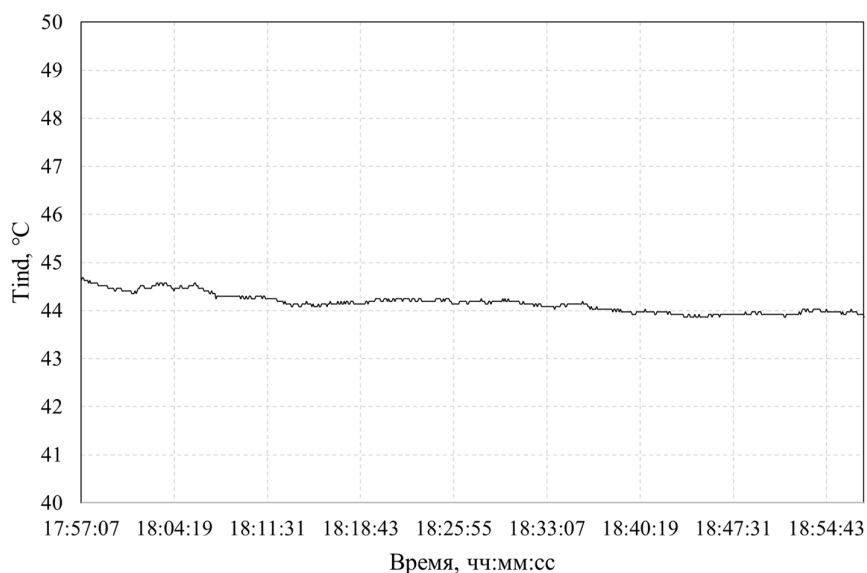


Рис. 7. Диаграмма температуры обмотки индуктора в процессе испытаний

Fig. 7. Temperature diagram of the inductor winding during testing

Испытания прототипа прошли без возникновения нештатных и аварийных ситуаций. В результате испытаний были осуществлены измерения и считывание необходимых параметров прототипа индукционного канального нагревателя. Все параметры, определенные в процессе испытаний, сведены в табл. 1.

В процессе нагрева и поддержания температуры критической деформации расплава в желобе не наблюдалось, а проявления пинч-эффекта в исследуемом диапазоне мощностей выявлено не было, что экспериментально подтверждает возможность индукционного нагрева расплава алюминия в литейных желобах. Однако теоретическое и экспериментальное исследо-

Таблица 1. Основные параметры прототипа индукционного канального нагревателя

Table 1. The main parameters of the induction duct heater prototype

Параметр	Испытания
Потребляемая активная мощность прототипа, кВт	2,7
Полная мощность, кВА	3,9
Температура нагрева жидкого металла, °C	735
Скорость нагрева расплава, °C/мин	5,4
Температура перегрева жидкого металла (Ткон-Тнач), °C	33,13
Температура обмотки индуктора, °C	44

вание критических режимов с определением точек электродинамического пережания расплава остается актуальной задачей.

Заключение

С помощью экспериментального исследования на прототипе индукционного канального нагревателя определены количественные и качественные характеристики процесса нагрева расплава алюминия, на основании которых можно сделать следующие выводы.

1. Экспериментально подтверждена возможность индукционного нагрева расплава алюминия в открытом горизонтальном канале при отсутствии критических деформаций свободной поверхности расплава и возникновения пинч-эффекта.

2. Установлено, что при работе прототипа индукционного канального нагревателя средняя скорость нагрева алюминиевого расплава в диапазоне температур от 701 до 735 °C составила 5,4 °C/мин. Полученные динамические характеристики подтверждают, что разработанное устройство способно не только компенсировать тепловые потери при транспортировке расплава по литейному желобу, но и осуществлять дополнительный подогрев до заданных технологических параметров непосредственно в процессе литья.

3. Показано, что сочетание предложенного метода индукционного канального нагрева и стандартных алгоритмов регулирования позволяет осуществлять прецизионное поддержание температуры расплава (с точностью 1–3 °C), что является критически важным фактором при получении алюминиевых сплавов ответственного назначения, где строгое соблюдение узкого температурного интервала определяет стабильность структуры и механических свойств готовой продукции.

Список литературы / References

[1] Шмитц К., Домагала И., Халг П. *Рециклинг алюминия. Справочное руководство*. Москва: АЛЮСИЛ МВиТ, 2008. 528 с. [Schmitz K., Domagala I., Halg P. *Aluminium Recycling. Reference Guide*. Moscow, ALUSIL MViT, 2008, 528 p. (in Russian)]

[2] Костин И.В., Безруких А.И., Беляев С.В., Фролов В.Ф., Губанов И.Ю., Лесив Е.М., Степаненко Н.А. Исследование технологии модифицирования при литье плоских слитков 5XXX серии. *Журнал СФУ. Химия*, 2017, 10(1), 90–98. [Kostin I. V., Bezrukikh A. I., Belyaev S. V.,

Frolov V. F., Gubanov I. Yu., Lesiv E. M., Stepanenko N. A. Investigation of modification technology in casting of 5XXX series flat ingots. *J. Sib. Fed. Univ. Chem.*, 2017, 10(1), 90–98 (in Russian)]

[3] Партыко Е. Г. *Исследование и совершенствование процесса дегазации при заготовительном литье алюминия и его сплавов*: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2022. [Partyko E. G. *Investigation and improvement of degassing process during billet casting of aluminum and its alloys*. Thesis ... cand. of tech. sci. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2022 (in Russian)]

[4] Патент RU № 2831575. *Способ нагрева жидкого металла и устройство для его осуществления* / Хацаюк М. Ю., Винтер Э. Р., Тимофеев В. Н. Опубл. 09.12.2024. [Patent RU No. 2831575. *Method for heating liquid metal and device for its implementation* / Khatsayuk M. Yu., Vinter E. R., Timofeev V. N. Published 09.12.2024 (in Russian)]

[5] Spitans S., Jakovičs A., Baake E., Nacke B. Numerical modelling of free surface dynamics of conductive melt in induction crucible furnace. *Magnetohydrodynamics*, 2010, 46(4), 425–436.

[6] Dzelme V. *Electromagnetically driven liquid metal flows with strong free surface dynamics*. Ph. D. Thesis in Physics. Latvia, 2024. 142 p.

[7] Minakov A., Khatsayuk M., Demidovich V., Pervukhin M. Mathematical modeling of casting processes in electromagnetic field. *Magnetohydrodynamics*, 2015, 51(1), 57–65.

[8] Aliferov A. I., Morev A. E., Andreev M. N. Investigation of MHD Processes During Levitational Heating of Aluminum Products. *2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, 2024, 1700–1705.

[9] Хацаюк М. Ю., Винтер Э. Р., Кизжаев И. В., Тимофеев В. Н., Тимофеев А. С., Барсуков И. В. Численное исследование поведения свободной поверхности расплава алюминия при индукционном нагреве в литейном желобе. *Технология легких сплавов*, 2026, (2). [Khatsayuk M. Yu., Vinter E. R., Kizhaev I. V., Timofeev V. N., Timofeev A. S., Barsukov I. V. Numerical investigation of molten aluminum free surface behavior during induction heating in a casting trough. *Tekhnologiya Legkikh Splavov*, 2026, (2) (in Russian)]

EDN: MXNTVQ

УДК 004.942:623.4.023.43

**Justification of a Rational Number of Transmissions
of the Laser Rangemetering System
of an Anti-Aircraft Artillery Complex
to Achieve Reliable Identification of UAV
as Target Among Air Biological Objects
and Deliberate Deceptions**

**Yuriy L. Koziratskiy^{a, b},
Dmitriy V. Prokhorov^a, Anton A. Koziratskiy^c,
Anton A. Barkalov^{a*} and Vyacheslav A. Shamarin^a**

*^aMilitary Education and Research Centre of Military-Air Forces
«Military-Air Academy Named After Professor N. E. Zhukovsky
and Yu. A. Gagarin»*

Voronezh, Russian Federation

^bJoint-Stock Company «Concert «Sozvezdie»

Voronezh, Russian Federation

*^cCenter for Systems Research and Development
of the Branch of JSC “NTC REB”*

Voronezh, Russian Federation

Received 19.12.2026, received in revised form 01.07.2026, accepted 15.07.2026

Abstract. For cases of statistical distributions of photoelectrons at the output of a laser locator receiver according to the Poisson and Bose-Einstein laws, methods have been developed to justify a rational number of pulses for the laser rangefinder system of an anti-aircraft artillery system, ensuring reliable discrimination (identification) of a UAV among decoys. The methods are based on solving the discrimination problem using the Neyman-Pearson criteria, the ideal observer criterion, and the Wald method. They allow, for the required values of recognition, confusion, and total error probabilities with given ratios of the UAV and decoy radar cross sections, to determine the number of laser locator pulses sufficient to distinguish the UAV from decoys in the minimum time.

© 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: barkalov_anton_a@mail.ru

Keywords: unmanned aerial vehicle, discrimination, false targets, laser ranging system, anti-aircraft artillery system.

Citation: Koziratskiy Yu. L., Prokhorov D. V., Koziratskiy A. A., Barkalov A. A., Shamarin V. A. Justification of a Rational Number of Transmissions of the Laser Rangemetering System of an Anti-Aircraft Artillery Complex to Achieve Reliable Identification of UAV as Target Among Air Biological Objects and Deliberate Deceptions. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(6), 779–792. EDN: MXNTVQ



**Обоснование рационального числа посылок
лазерной системы дальнометрирования
зенитного артиллерийского комплекса
для достижения достоверного выделения БЛА
как цели среди воздушных биологических объектов
и преднамеренных ложных целей**

Ю. Л. Козирацкий^{а, б}, Д. В. Прохоров^а,

А. А. Козирацкий^б, А. А. Баркалов^а, В. А. Шамарин^а

*^аВоенный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«ВВА имени проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»*

Российская Федерация, Воронеж

^бАО «Концерн «Созвездие»

Российская Федерация, Воронеж

*^сЦентр системных исследований
и разработок филиала АО «НТЦ РЭБ»*

Российская Федерация, Воронеж

Аннотация. Для случаев статистических распределений фотоэлектронов на выходе приемника лазерного локатора по законам Пуассона и Бозе-Эйнштейна разработаны методики обоснования рационального числа посылок лазерной дальномерной системы зенитно-артиллерийского комплекса, обеспечивающего достижение достоверного различения (выделения) БЛА среди ложных целей. Методики основываются на решении задачи различения по критериям Неймана-Пирсона, идеального наблюдателя и методом Вальда. Они позволяют для требуемых значений вероятностей распознавания, перепутывания и суммарной ошибки при заданных соотношениях эффективных площадей рассеяния БЛА и ложной цели определять число посылок лазерного локатора, достаточное для выделения БЛА среди ложных целей за минимальное время.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, различение, ложные цели, лазерная система дальнометрирования, зенитный артиллерийский комплекс.

Цитирование: Козирацкий Ю. Л. Обоснование рационального числа посылок лазерной системы дальнометрирования зенитного артиллерийского комплекса для достижения достоверного выделения БЛА как цели среди воздушных биологических объектов и преднамеренных ложных целей / Ю. Л. Козирацкий, Д. В. Прохоров, А. А. Козирацкий, А. А. Баркалов, В. А. Шамарин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(6). С. 779–792. EDN: MXNTVQ

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БЛА) представляют растущую многогранную угрозу гражданской и военной инфраструктуре, объектам и людям [1]. По оценкам подавляющего большинства военных экспертов в войнах и военных конфликтах XXI века все значимые в военном отношении государства будут делать ставку на применение сравнительно дешевых малоразмерных БЛА. Для борьбы с такими БЛА, а также их роями могут использоваться специализированные зенитные артиллерийские комплексы (ЗАК), оптимизированные под эти задачи. ЗАК в составе системы противовоздушной обороны (ПВО) работают совместно с радиолокационными и оптическими средствами обнаружения для выявления целей. Они способны быстро перенацеливаться и вести огонь в автоматическом режиме. Для эффективного информационного обеспечения таких ЗАК используется лазерная система дальнометрирования (ЛСД). При этом актуальным является различение (выделение) цели (БЛА) среди ложных целей (птиц, искусственных объектов) с заданным качеством и минимальным затраченным временем на принятие решения. При решении этой задачи ЛСД по эффективной площади рассеяния (ЭПР) важным показателем, обуславливающим ее эффективность, является число посылок ЛСД [2, 3].

Поэтому *целью работы* являлось обоснование рационального числа посылок ЛСД ЗАК, обеспечивающего достоверное различение (выделение) БЛА среди ложных целей.

Рассмотрим задачу обнаружения лазерной локационной системой (ЛЛС) сигнала, отраженного от истинной цели $S_1(t)$ на фоне внутренних и внешних шумов (помех) $n_n(t)$, и сигнала, отраженного от воздушных биологических объектов и преднамеренных ложных целей $S_2(t)$, как задачу различения двух сигналов $S_1(t)$ и $S_2(t)$.

В данном случае нам необходимо синтезировать приемное устройство, оптимальным образом принимающее решение об истинности гипотез:

$$\begin{aligned} H_1 : n(t) &= S_1(t) + n_n(t) \\ H_2 : n(t) &= S_2(t) + n_n(t) \end{aligned} \quad (1)$$

При использовании этого критерия выборка из реализации $n_1, \dots, n_N$, имеющаяся на входе приемника, отождествляется с наличием сигнала S_1 в том случае, если выполняется неравенство

$$\lambda(n_1, \dots, n_N) = \frac{p_1(n_1, \dots, n_N)}{p_2(n_1, \dots, n_N)} \geq \lambda_0, \quad (2)$$

или отождествляется с наличием сигнала S_2 , если $\lambda(n_1, \dots, n_N) < \lambda_0$, где $p_1(n_1, \dots, n_N)$ и $p_2(n_1, \dots, n_N)$ – совместные плотности вероятности для совокупности выборочных значений при условии, что присутствует сигнал S_1 и сигнал S_2 соответственно; λ_0 – пороговая величина, способ определения которой зависит от выбранного критерия обнаружения (различения).

Так как выборочные значения статистически независимы, то многомерное отношение правдоподобия

$$\lambda = \prod_{i=1}^N \frac{p_1(n_i)}{p_2(n_i)}, \quad (3)$$

где $p_1(n_i)$ и $p_2(n_i)$ – плотности вероятности i -ых выборочных значений при наличии сигнала S_1 и сигнала S_2 соответственно.

Алгоритм работы оптимального приемника определяется видом плотностей вероятности $p_1(n_i)$ и $p_2(n_i)$.

Как показано в [4], при ведении лазерной локации в случае слабых принимаемых сигналов статистическое распределение шумовых и сигнальных фотоэлектронов часто моделируется статистикой Пуассона. Также после прохождения лазерным зондирующим излучением неоднородной турбулентной атмосферы или при отражении его оптически «шероховатой» поверхностью распределение фотоэлектронов на временном интервале будет подчинено геометрическому закону (закону Бозе-Эйнштейна) [4]. Поэтому далее рассмотрим решение вышеуказанной задачи для этих двух случаев.

1. Для случая пуассоновских распределений:

$$p_1(n_i) = \frac{(\bar{S}_{1i} + \bar{n}_n)^{n_i}}{n_i!} \exp[-(\bar{S}_{1i} + \bar{n}_n)]; \quad (4)$$

$$p_2(n_i) = \frac{(\bar{S}_{2i} + \bar{n}_n)^{n_i}}{n_i!} \exp[-(\bar{S}_{2i} + \bar{n}_n)], \quad (5)$$

где $\bar{S}_{1i}$ и $\bar{S}_{2i}$ – средние значения сигнальных (соответствующих сигналам S_1 и S_2) фотоэлектронов на выходе фотоприемника; $\bar{n}_n$ – среднее значение фотоэлектронов, обусловленных воздействием аддитивных внутренних и внешних шумов (помех) [4–7].

Тогда отношение правдоподобия можно записать в следующем виде:

$$\lambda = \prod_{i=1}^N \left(\frac{\bar{S}_{1i} + \bar{n}_n}{\bar{S}_{2i} + \bar{n}_n} \right)^{n_i} \exp[-(\bar{S}_{1i} - \bar{S}_{2i})], \quad (6)$$

а с учетом $\Lambda = \ln \lambda$

$$\Lambda = \sum_{i=1}^N \left[n_i \ln \frac{\bar{S}_{1i} + \bar{n}_n}{\bar{S}_{2i} + \bar{n}_n} - (\bar{S}_{1i} - \bar{S}_{2i}) \right]. \quad (7)$$

Рассмотрим в качестве оптимального приемник, работающий по правилу Неймана-Пирсона (с квантовым счетчиком в качестве чувствительного элемента). Данный критерий обеспечивает максимум вероятности распознавания P_p при фиксированной вероятности перепутывания $P_{пер}$ (ошибка первого рода, т.е. принятие ложной цели за истинную) [2, 8]. Тогда, применительно к выбранному критерию, получаем алгоритм

$$\Lambda = \sum_{i=1}^N \left[n_i \ln \frac{\bar{S}_{1i} + \bar{n}_n}{\bar{S}_{2i} + \bar{n}_n} - (\bar{S}_{1i} - \bar{S}_{2i}) \right] \geq \Lambda_0, \quad (8)$$

где $\Lambda_0 = \ln \lambda_0$.

Получим числовые характеристики отношения правдоподобия (7). Для удобства запишем (7) в виде:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^N [a_i n_i - b_i], \quad (9)$$

где $a_i = \ln \frac{\bar{S}_{1i} + \bar{n}_n}{\bar{S}_{2i} + \bar{n}_n}$; $b_i = \bar{S}_{1i} - \bar{S}_{2i}$.

Для нахождения вероятностей распознавания и перепутывания необходимо знание распределений вероятностей Λ при наличии сигнала S_1 и сигнала S_2

$$P_p = \int_{\Lambda_0}^{\infty} f_{c1}(\Lambda) d\Lambda; P_{nep} = \int_{\Lambda_0}^{\infty} f_{c2}(\Lambda) d\Lambda, \quad (10)$$

которые в силу центральной предельной теоремы близки к нормальному

$$\begin{aligned} f_{c1}(\Lambda) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{1\Lambda}} \exp\left[-\frac{(\Lambda - m_{1\Lambda})^2}{2\sigma_{1\Lambda}^2}\right]; \\ f_{c2}(\Lambda) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{2\Lambda}} \exp\left[-\frac{(\Lambda - m_{2\Lambda})^2}{2\sigma_{2\Lambda}^2}\right]. \end{aligned} \quad (11)$$

Тогда

$$\begin{aligned} P_p &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{1\Lambda}} \int_{\Lambda_0}^{\infty} \exp\left[-\frac{(\Lambda - m_{1\Lambda})^2}{2\sigma_{1\Lambda}^2}\right] d\Lambda = 1 - \Phi\left(\frac{\Lambda_0 - m_{1\Lambda}}{\sigma_{1\Lambda}}\right); \\ P_{nep} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{2\Lambda}} \int_{\Lambda_0}^{\infty} \exp\left[-\frac{(\Lambda - m_{2\Lambda})^2}{2\sigma_{2\Lambda}^2}\right] d\Lambda = 1 - \Phi\left(\frac{\Lambda_0 - m_{2\Lambda}}{\sigma_{2\Lambda}}\right), \end{aligned} \quad (12)$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ – интеграл вероятности.

Определяя из P_{nep} порог $\Lambda_0 = m_{2\Lambda} + \sigma_{2\Lambda} \Phi^{-1}(1 - P_{nep})$, получим

$$P_p = \Phi\left(\frac{m_{1\Lambda} - m_{2\Lambda} - \sigma_{2\Lambda} \Phi^{-1}(1 - P_{nep})}{\sigma_{1\Lambda}}\right), \quad (13)$$

где $\Phi^{-1}(x)$ – функция, обратная интегралу вероятности, удовлетворяющая соотношению $\Phi^{-1}[\Phi(x)] = x$.

С учетом статистической независимости слагаемых в (9) и в предположении того, что интенсивность сигналов в течение выборки не меняется, для известного распределения случайной величины n_i найдем математические ожидания и дисперсии отношения правдоподобия (9) при наличии сигналов S_1 и S_2 соответственно:

$$\begin{aligned} m_{1\Lambda} &= \sum_{i=1}^N \left[a_i (\bar{S}_{1i} + \bar{n}_{\Pi}) - b_i \right] = N \left[\ln \frac{\bar{S}_1 + \bar{n}_{\Pi}}{\bar{S}_2 + \bar{n}_{\Pi}} (\bar{S}_1 + \bar{n}_{\Pi}) - \bar{S}_1 + \bar{S}_2 \right]; \\ m_{2\Lambda} &= \sum_{i=1}^N \left[a_i (\bar{S}_{2i} + \bar{n}_{\Pi}) - b_i \right] = N \left[\ln \frac{\bar{S}_1 + \bar{n}_{\Pi}}{\bar{S}_2 + \bar{n}_{\Pi}} (\bar{S}_2 + \bar{n}_{\Pi}) - \bar{S}_1 + \bar{S}_2 \right]; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\sigma_{1\Lambda}^2 = \sum_{i=1}^N \left[a_i^2 (\bar{S}_{1i} + \bar{n}_{\Pi}) \right] = N \left(\ln \frac{\bar{S}_1 + \bar{n}_{\Pi}}{\bar{S}_2 + \bar{n}_{\Pi}} \right)^2 (\bar{S}_1 + \bar{n}_{\Pi}); \quad (15)$$

$$\sigma_{2\Lambda}^2 = \sum_{i=1}^N \left[a_i^2 (\bar{S}_{2i} + \bar{n}_{\text{н}}) \right] = N \left(\ln \frac{\bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}}}{\bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}}} \right)^2 (\bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}}).$$

С учетом (13), (14) и (15) вероятность распознавания может быть определена следующим образом:

$$P_p = \Phi \left[\frac{\sqrt{N}(\bar{S}_1 - \bar{S}_2) - \sqrt{\bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}}} \Phi^{-1}(1 - P_{\text{неп}})}{\sqrt{\bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}}}} \right]. \quad (16)$$

Из (16) следует, что значение объема выборки (число посылок ЛЛС), необходимое для принятия решения о типе цели, может быть определено как

$$N = \left[\frac{\sqrt{\bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}}} \Phi^{-1}(1 - P_{\text{неп}}) - \sqrt{\bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}}} \Phi^{-1}(1 - P_p)}{\bar{S}_1 - \bar{S}_2} \right]^2. \quad (17)$$

При методе последовательного анализа Вальда [9] выражение для алгоритма распознавания можно записать в следующем виде:

$$\Lambda = \ln \frac{\bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}}}{\bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}}} \sum_{i=1}^N n_i - N(\bar{S}_1 - \bar{S}_2) \stackrel{H_1}{\geq} \ln \frac{P_p}{P_{\text{неп}}}, \quad (18)$$

$$\Lambda = \ln \frac{\bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}}}{\bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}}} \sum_{i=1}^N n_i - N(\bar{S}_1 - \bar{S}_2) \stackrel{H_2}{\leq} \ln \frac{1 - P_p}{1 - P_{\text{неп}}}. \quad (19)$$

Из (18) и (19) следует правило принятия решения:

$$\text{если } \sum_{i=1}^N n_i \geq \frac{\ln \frac{P_p}{P_{\text{неп}}} + N(\bar{S}_1 - \bar{S}_2)}{\ln \frac{\bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}}}{\bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}}}}, \quad (20)$$

то принимается решение о наличии сигнала S_1 ;

$$\text{если } \sum_{i=1}^N n_i \leq \frac{\ln \frac{1 - P_p}{1 - P_{\text{неп}}} + N(\bar{S}_1 - \bar{S}_2)}{\ln \frac{\bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}}}{\bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}}}}, \quad (21)$$

то принимается решение о наличии сигнала S_2 .

При этом для среднего числа посылок ЛЛС, необходимого для принятия решения о типе цели (наличии сигнала S_1 и сигнала S_2), можно найти

$$N_1 = \frac{\ln \frac{P_p}{P_{\text{неп}}}}{(\bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}}) \ln \frac{\bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}}}{\bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}}} - (\bar{S}_1 - \bar{S}_2)}, \quad (22)$$

$$N_2 = \frac{\ln \frac{1 - P_p}{1 - P_{nep}}}{(\bar{S}_2 + \bar{n}_n) \ln \frac{\bar{S}_1 + \bar{n}_n}{\bar{S}_2 + \bar{n}_n} - (\bar{S}_1 - \bar{S}_2)} \quad (23)$$

Величины $\bar{S}_1$, $\bar{S}_2$ и $\bar{n}_n$ можно определить следующим образом [4, 10]:

$$\bar{S} = \frac{\eta \tau_n P_c \tau_{np} \tau_{nd} T_a^2 \sigma_{об} d_{np}^2}{h\nu 4\pi \theta^2 D_{об}^4} \text{ для } S_m > S_{об}; \quad (24)$$

$$\bar{n}_n = \frac{\eta \tau_n Q_\lambda \Delta \lambda \pi \tau_{np} \theta_n^2 d_{np}^2 \sigma_p (1 - T_a)}{h\nu 64 \sigma_a} + \frac{i_t}{e^- G} \tau_n, \quad (25)$$

где η и τ_n – квантовая эффективность приемника и его время накопления; $h\nu$ – энергия кванта; P_c – мощность оптического излучения ЛЛС; τ_{nd} и τ_{np} – коэффициенты пропускания излучения оптической системой передатчика и приемника соответственно; T_a – коэффициент пропускания среды распространения; $\sigma_{об}$ – ЭПР объекта; $S_{об}$ – видимая площадь объекта; S_{nl} – площадь сечения лазерного пучка в плоскости объекта; d_{np} – диаметр входного зрачка приемника; θ – угол расходимости пучка излучения лазера; $D_{об}$ – дальность от ЛЛС до объекта; φ – угол между лазерным лучом и нормалью к плоскости падения; Q_λ – спектральная плотность мощности излучения Солнца; $\Delta \lambda$ – полоса пропускания оптического фильтра на входе приемника; θ_n – угол поля зрения приемника; σ_a и σ_p – показатели ослабления и рассеяния атмосферы; i_t – темновой ток анода; G – коэффициент усиления приемника; e^- – заряд электрона.

С помощью полученных выражений (17), (22) и (23) проведены расчеты среднего числа посылок для следующих исходных данных: $P_c = 30$ кВт; $\sigma_2 = 6,3 \times 10^{-3}$ м²; $d_{np} = 0,1$ м; $\eta = 0,035$;

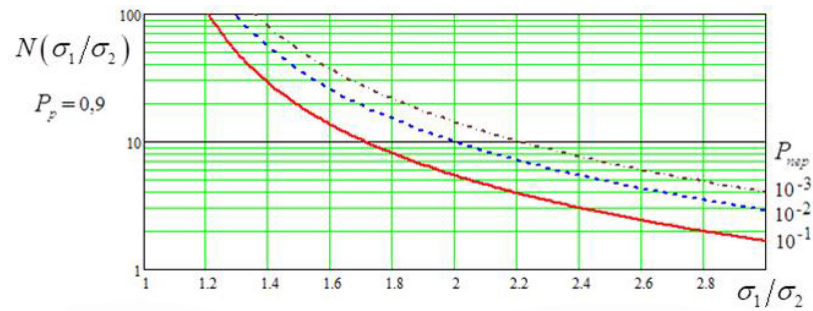
$$\tau_n = 1,67 \times 10^{-8} \text{ с}; \tau_{nd} = \tau_{np} = 0,5; T_a = 0,67; \theta = 1 \text{ мрад}; D_{об} = 2 \text{ км}; Q_\lambda = 500 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ мкм}}; \lambda = 0,632 \text{ мкм};$$

$$\Delta \lambda = 5 \times 10^{-4} \text{ мкм}; \theta_n = 4 \text{ мрад}; \sigma_a = 2 \times 10^{-4} \text{ м}^{-1}; \sigma_p = 10^{-4} \text{ м}^{-1}; \varphi = 0 \text{ град}; i_t = 2 \times 10^{-9} \text{ А}; G = 10^7.$$

На рис. 1 и 2 представлены графики зависимостей среднего числа посылок от соотношения ЭПР БЛА σ_1 и ложной цели σ_2 при различных значениях вероятностей различения P_p и перепутывания P_{nep} , а на рис. 3 – аналогичные зависимости, совместно построенные для сравнения эффективности рассмотренных двух алгоритмов различения.

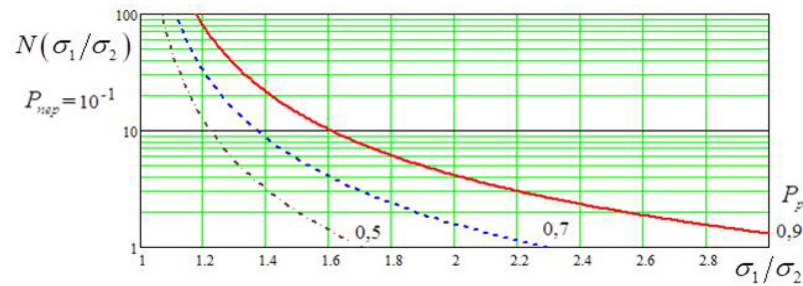
Анализ полученных результатов показывает, что увеличение вероятности перепутывания приводит к уменьшению длительности процесса выделения БЛА. При этом применение последовательного анализа Вальда (при увеличении P_{nep} с 10^{-3} до 10^{-1}) оперативней правила Неймана-Пирсона в $\sim 1,2 \div 1,6$ раза. При снижении вероятности распознавания с 0,9 до 0,5 выигрыш по длительности процесса распознавания БЛА имеет правило Неймана-Пирсона (число посылок при использовании метода Вальда меняется незначительно).

Таким образом, применение метода последовательного анализа Вальда дает выигрыш в случае высоких требований к достоверности различения БЛА и малого числа ложных целей.



а) при различных значениях вероятности перепутывания

a) for different values of the probability of confusion



б) при различных значениях вероятности различения

b) for different values of the probability of discrimination

Рис. 1. Графики зависимостей среднего числа посылок ЛЛС от соотношения ЭПР БЛА σ_1 и ложной цели σ_2 для различения по правилу Неймана-ПирсонаFig. 1. Graphs of the dependence of the average number of LLS messages on the ratio of the RCS of the UAV σ_1 and the false target σ_2 for discrimination according to the Neyman-Pearson rule

2. Для случая распределений по закону Бозе-Эйнштейна:

$$p_1(n_i) = \frac{1}{1 + \bar{S}_{1i} + \bar{n}_n} \left(\frac{\bar{S}_{1i} + \bar{n}_n}{1 + \bar{S}_{1i} + \bar{n}_n} \right)^{n_i}; \quad (26)$$

$$p_2(n_i) = \frac{1}{1 + \bar{S}_{2i} + \bar{n}_n} \left(\frac{\bar{S}_{2i} + \bar{n}_n}{1 + \bar{S}_{2i} + \bar{n}_n} \right)^{n_i}. \quad (27)$$

Тогда отношение правдоподобия можно записать в следующем виде:

$$\lambda = \prod_{i=1}^N \frac{1 + \bar{S}_{2i} + \bar{n}_n}{1 + \bar{S}_{1i} + \bar{n}_n} \left[\frac{(\bar{S}_{1i} + \bar{n}_n)(1 + \bar{S}_{2i} + \bar{n}_n)}{(\bar{S}_{2i} + \bar{n}_n)(1 + \bar{S}_{1i} + \bar{n}_n)} \right]^{n_i}, \quad (28)$$

а с учетом $\Lambda = \ln \lambda$

$$\Lambda = \sum_{i=1}^N \ln \frac{1 + \bar{S}_{2i} + \bar{n}_n}{1 + \bar{S}_{1i} + \bar{n}_n} + \sum_{i=1}^N \left[n_i \ln \frac{(\bar{S}_{1i} + \bar{n}_n)(1 + \bar{S}_{2i} + \bar{n}_n)}{(\bar{S}_{2i} + \bar{n}_n)(1 + \bar{S}_{1i} + \bar{n}_n)} \right]. \quad (29)$$

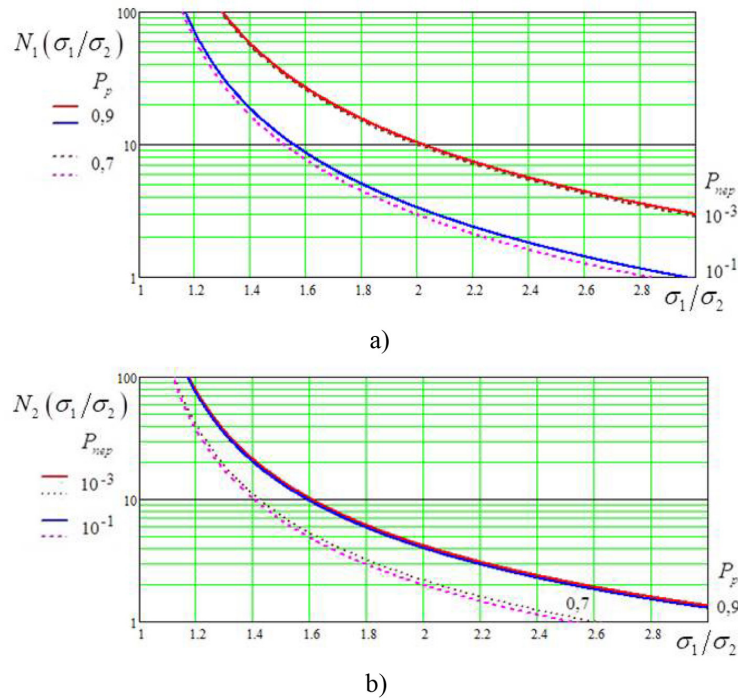


Рис. 2. Графики зависимостей среднего числа посылок ЛЛС, необходимых для принятия решения о наличии БЛА N_1 (а) и ложной цели N_2 (б), от соотношения ЭПР БЛА σ_1 и ложной цели σ_2 для различения методом последовательного анализа Вальда

Fig. 2. Graphs of dependencies of the average number of LLS parcels required to make a decision on the availability of UAVs N_1 (a) and a false target N_2 (b), from the UAV RCS ratio σ_1 and a false target σ_2 for differentiation by the Wald sequential analysis method

Для решения задачи различения сигналов S_1 и S_2 применим критерий идеального наблюдателя, в соответствии с которым решение о наличии сигнала S_1 должно приниматься при $\Lambda \geq 0$, в противном случае принимается решение о наличии сигнала S_2 :

$$\Lambda^* = \sum_{i=1}^N \left\{ n_i \left[\ln \frac{\bar{S}_{1i} + \bar{n}_n}{1 + \bar{S}_{1i} + \bar{n}_n} - \ln \frac{\bar{S}_{2i} + \bar{n}_n}{1 + \bar{S}_{2i} + \bar{n}_n} \right] \right\} \begin{matrix} \geq \\ < \end{matrix} \begin{matrix} H_1 \\ H_2 \end{matrix} \Lambda_0. \quad (30)$$

где $\Lambda_0 = \sum_{i=1}^N \ln \frac{1 + \bar{S}_{1i} + \bar{n}_n}{1 + \bar{S}_{2i} + \bar{n}_n}$ – порог различения.

В соответствии с выражением (30) схема оптимального устройства различения сигналов S_1 и S_2 будет иметь вид, представленный на рис. 4.

Произведем оценку эффективности различения в соответствии с полученным алгоритмом. Закон распределения получаемой на выходе сумматора схемы различения величины в соответствии с центральной предельной теоремой стремится к нормальному.

Оценим числовые характеристики такого распределения в случае гипотез H_1 и H_2 . С учетом статистической независимости слагаемых в (30) и в предположении того, что интенсивность сигналов в течение выборки не меняется, можно получить

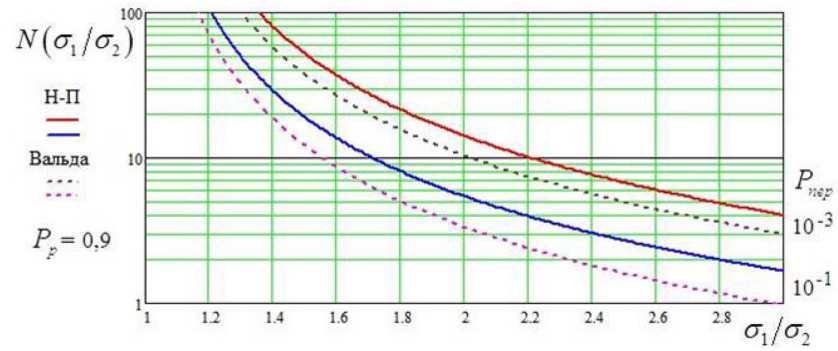
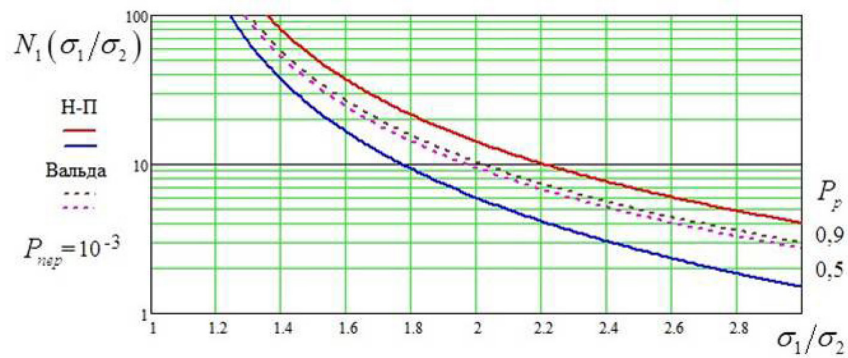
а) при различных значениях $P_{\text{пер}}$ a) at different values $P_{\text{пер}}$ б) при различных значениях P_p b) at different values P_p

Рис. 3. Графики зависимостей среднего числа посылок ЛЛС от соотношения ЭПР БЛА σ_1 и ложной цели σ_2 для двух алгоритмов выделения БЛА среди ложных целей

Fig. 3. Graphs of the dependence of the average number of LLS parcels on the UAV EPR ratio σ_1 and a false target σ_2 for two algorithms for identifying UAVs among false targets

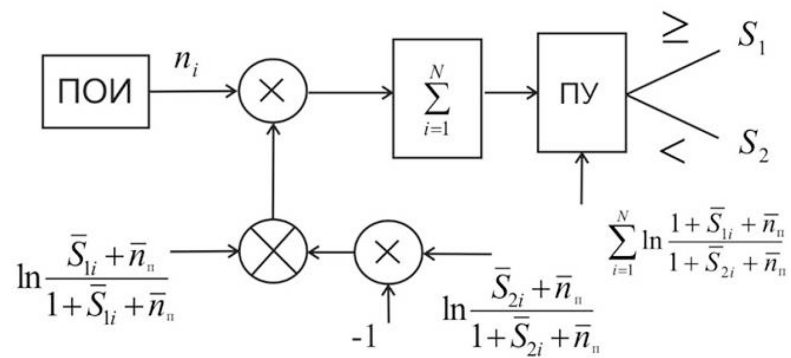


Рис. 4. Схема оптимального устройства распознавания БЛА

Fig. 4. Schematic diagram of an optimal UAV recognition device

$$m_{1\Lambda^*} = N(\bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}})a; \quad m_{2\Lambda^*} = N(\bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}})a; \quad (31)$$

$$\sigma_{1\Lambda^*}^2 = N(\bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}})(1 + \bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}})a^2; \quad \sigma_{2\Lambda^*}^2 = N(\bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}})(1 + \bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}})a^2, \quad (32)$$

где $a = \ln \frac{(\bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}})(1 + \bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}})}{(\bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}})(1 + \bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}})}$.

С учетом (31) и (32) определим вероятности распознавания и перепутывания следующим образом:

$$P_p = \int_{\Lambda_0}^{\infty} f_{c1}(\Lambda^*) d\Lambda^* = \Phi\left(\frac{m_{1\Lambda^*} - \Lambda_0}{\sigma_{1\Lambda^*}}\right) = \Phi\left(\frac{\sqrt{N}\left[a(\bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}}) - \ln \frac{1 + \bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}}}{1 + \bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}}}\right]}{a\sqrt{(\bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}})(1 + \bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}})}}\right); \quad (33)$$

$$P_{nep} = \int_{\Lambda_0}^{\infty} f_{c2}(\Lambda^*) d\Lambda^* = \Phi\left(\frac{m_{2\Lambda^*} - \Lambda_0}{\sigma_{2\Lambda^*}}\right) = \Phi\left(\frac{\sqrt{N}\left[a(\bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}}) - \ln \frac{1 + \bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}}}{1 + \bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}}}\right]}{a\sqrt{(\bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}})(1 + \bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}})}}\right). \quad (34)$$

Откуда несложно получить выражения для определения зависимостей среднего числа посылок от заданных вероятностей P_e и P_{nep}

$$N(P_p) = \left(\frac{\sqrt{(\bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}})(1 + \bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}})} \Phi^{-1}(1 - P_p)}{\frac{1}{a} \ln \frac{1 + \bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}}}{1 + \bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}}} - \bar{S}_1 - \bar{n}_{\text{н}}} \right)^2; \quad (35)$$

$$N(P_{nep}) = \left(\frac{\sqrt{(\bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}})(1 + \bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}})} \Phi^{-1}(1 - P_{nep})}{\frac{1}{a} \ln \frac{1 + \bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}}}{1 + \bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}}} - \bar{S}_2 - \bar{n}_{\text{н}}} \right)^2. \quad (36)$$

Для определения вероятности суммарной ошибки

$$P_e = \frac{1}{2} \left[\int_{-\infty}^{\Lambda_0} f_{c1}(\Lambda^*) d\Lambda^* + \int_{\Lambda_0}^{\infty} f_{c2}(\Lambda^*) d\Lambda^* \right] \quad (37)$$

можно получить следующее выражение:

$$P_e = \frac{1}{2} \left[\Phi\left(\frac{\sqrt{N}\left[\ln \frac{1 + \bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}}}{1 + \bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}}} - a(\bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}})\right]}{a\sqrt{(\bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}})(1 + \bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}})}}\right) + \Phi\left(\frac{\sqrt{N}\left[a(\bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}}) - \ln \frac{1 + \bar{S}_1 + \bar{n}_{\text{н}}}{1 + \bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}}}\right]}{a\sqrt{(\bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}})(1 + \bar{S}_2 + \bar{n}_{\text{н}})}}\right) \right]. \quad (38)$$

На рис. 5 представлены графики зависимостей среднего числа посылок ЛЛС от соотношения ЭПР БЛА σ_1 и ложной цели σ_2 при различных значениях вероятностей различения P_p

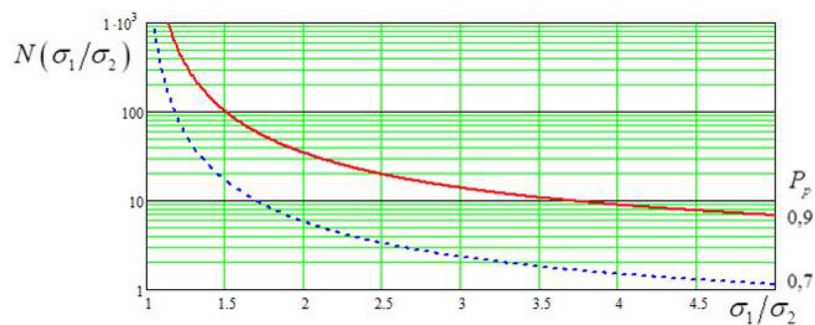
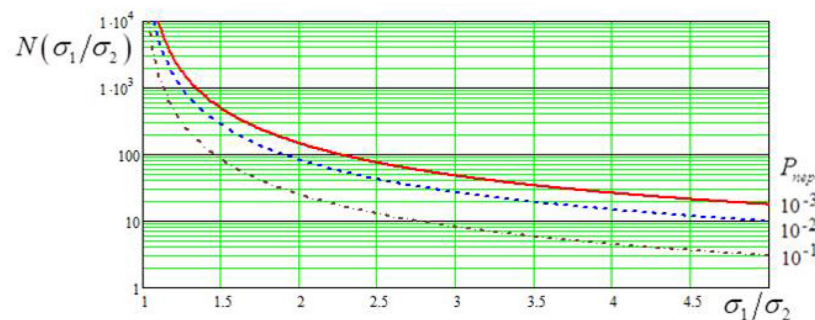
а) при различных значениях P_p a) at different values P_p б) при различных значениях $P_{пер}$ b) at different values $P_{пер}$

Рис. 5. Графики зависимостей среднего числа посылок ЛЛС от соотношения ЭПР БЛА σ_1 и ложной цели σ_2 при различных значениях вероятностей распознавания и перепутывания

Fig. 5. Graphs of the dependence of the average number of LLS parcels on the UAV EPR ratio σ_1 and a false target σ_2 for different values of recognition and confusion probabilities

и перепутывания $P_{пер}$, а на рис. 6 – графики зависимостей вероятности суммарной ошибки P_e от среднего числа посылок ЛЛС при различных значениях соотношения ЭПР σ_1/σ_2 .

Анализ полученных результатов показывает, что при распределении принимаемой ЛЛС аддитивной смеси оптических сигнала и помехи по закону Бозе-Эйнштейна в сравнении с пуассоновским для достоверного выделения БЛА среди ложных целей требуется большее число зондирующих посылок ЛЛС. Так, для обеспечения вероятности суммарной ошибки меньше 0,05 необходимо не менее 10 посылок при отношении $\sigma_1/\sigma_2 = 4$.

Таким образом, разработаны методики и проведено обоснование рационального числа посылок лазерной дальномерной системы зенитно-артиллерийского комплекса, обеспечивающего достижение достоверного различения (выделения) БЛА среди ложных целей для двух случаев. Для случая, когда статистические распределения фотоэлектронов на выходе приемника лазерного локатора подчиняются закону Пуассона, решалась задача различения по критерию Неймана-Пирсона и методом Вальда. Показано, что применение метода последовательного анализа Вальда дает выигрыш в случае высоких требований к достоверности различения БЛА и малого числа ложных целей. В предположении геометрического распре-

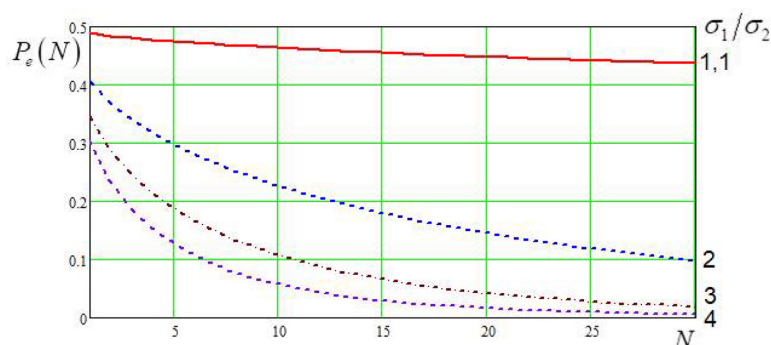


Рис. 6. Графики зависимостей вероятности суммарной ошибки от среднего числа посылок ЛЛС при различных значениях соотношения ЭПР БЛА σ_1 и ложной цели σ_2

Fig. 6. Graphs of the dependence of the probability of the total error on the average number of LLS messages for different values of the UAV RCS ratio σ_1 and a false target σ_2

деления статистики отчетов произведен синтез оптимального устройства и оценка эффективности выделения БЛА по критерию идеального наблюдателя. Методики позволяют для требуемых значений вероятностей распознавания, перепутывания и суммарной ошибки соответственно при заданных соотношениях ЭПР БЛА и ложной цели определять число посылок лазерного локаатора, достаточное для выделения БЛА среди ложных целей за минимальное время.

Список литературы / References

- [1] Макаренко С.И. *Противодействие беспилотным летательным аппаратам*. Монография. СПб.: Научные технологии, 2020. 204 с. [Makarenko S.I. *Counteracting unmanned aerial vehicles*. SPb, 2020. 204 p. (in Russian)]
- [2] Горелкин А.Л., Скрипкин В.А. *Методы распознавания*. М.: Высшая школа, 1984. [Gorelkin A.L., Skripkin V.A. *Recognition methods*. Moscow, 1984 (in Russian)]
- [3] Козирацкий Ю.Л. Определение оптимального числа зондирующих посылок лазерно-локационной системы в условиях атмосферных аэрозольных помех. *Радиотехника, спец. выпуск, "Информационный конфликт в спектре электромагнитных волн"*. 1995. 90–95. [Koziratskiy Yu. L. Determination of the optimal number of probing pulses of a laser-location system under conditions of atmospheric aerosol interference. *Radiotekhnika, spets. vypusk, "Informatsionnyy konflikt v spektre elektromagnitnykh voln"*. 1995. 90–95 (in Russian)]
- [4] Шереметьев А.Г. *Статистическая теория лазерной связи*. М.: Связь, 1971. 264 с. [Sheremetyev A. G. *Statistical theory of laser communication*. Moscow, 1971. 264 p. (in Russian)]
- [5] Козирацкий Ю.Л., Алабовский А.В. Особенности различения оптических сигналов, подчиняющихся пуассоновской статистике. *Радиотехника*, 1989, 1 [Koziratskiy Yu.L. Features of distinguishing optical signals obeying Poisson statistics / Yu.L. Koziratskiy, Alabovskiy A. V. *Radiotekhnika*, 1989, 1 (in Russian)]
- [6] Козирацкий Ю.Л., Прохоров Д.В., Курьянов И.Ю., Алабовский А.В. Обоснование устройства контроля степени проникновения лазерного луча в многослойный материал на основе пассивной локации. *Радиотехника*, 2015, 12, 66–71. [Koziratskiy Yu.L., Prokhorov D. V., Kur'yanov

I. Yu., Alabovskiy A. V. Rationale of devices for controlling the degree of laser beam penetration in multi-layer material based on passive location. *Radiotekhnika*, 2015, 12, 66–71 (in Russian)]

[7] *Обнаружение и координатометрия оптико-электронных средств, оценка параметров их сигналов*: Монография / под ред. Ю.Л. Козирацкого. М.: Радиотехника, 2015. 456 с. [*Detection and coordinate measurement of optical-electronic devices, evaluation of their signal parameters*. Ed. by Yu. L. Koziratskiy. Moscow, 2015. 456 p. (in Russian)]

[8] Левин Б.Р. *Теоретические основы статистической радиотехники*. Кн. II. М.: Сов. Радио, 1968 [Levin B.R. *Theoretical foundations of statistical radio engineering*. B. 2. Moscow, 1968 (in Russian)]

[9] Вальд А. *Последовательный анализ*. М.: Физматгиз, 1960 [Val'd A. *Sequential analysis*. Moscow, 1960 (in Russian)]

[10] Малашин М.С., Каминский Р.П., Борисов Ю.Б. *Основы проектирования лазерных локационных систем: учеб. пособие для радиотехн. спец. вузов*. М.: Высш. школа, 1983. 207 с. [Malashin M.S., Kaminskiy R. P., Borisov Yu. B. *Fundamentals of Designing Laser Location Systems: Textbook for radio engineering specialized universities*. Moscow, 1983. 207 p. (in Russian)]

EDN: KHYHQX

УДК 537.86:621.396.96

Study of the Reduction of Backscattering of a Conformal Metasurface with Orbital Angular Momentum Under Cylindrical and Spherical Bends

Maksim V. Azarov*

*National Research University of Electronic Technology
Zelenograd, Russian Federation*

Received 05.05.2026, received in revised form 01.07.2026, accepted 15.07.2026

Abstract. The results of a numerical study of the conformal properties of a thin-film reflecting metasurface forming an orbital angular momentum (OAM) to reduce monostatic backscattering are presented. Full-wave modeling in the CST Studio Suite was performed for smooth cylindrical (one axis) and spherical (two axes) bends with radii from ∞ to 2.5λ , as well as for the oblique incidence of a plane wave with left circular polarization in the frequency range 9–10 GHz. A comparison with a reference metasurface containing the same meta-atoms without azimuthal rotations made it possible to identify the contribution of the OAM profile. It is shown that the characteristic intensity dip in the backscattering diagram persists up to a radius of 2.5λ , and at radii $\geq 4\lambda$, the suppression is at least 10 dB. With an inclined drop of up to 60° , the maximum backscatter reduction reaches 23 dB without additional side lobes. The results confirm the robustness of the OAM phase distribution to geometric distortions and the possibility of using such metasurfaces as coatings for surfaces of double curvature.

Keywords: metasurface, OAM, orbital angular momentum, backscattering reduction, thin-film metasurface, conformity.

Citation: Azarov M. V. Study of the Reduction of Backscattering of a Conformal Metasurface with Orbital Angular Momentum Under Cylindrical and Spherical Bends. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(6), 793–802. EDN: KHYHQX



Исследование снижения обратного рассеяния конформной метаповерхности с орбитальным угловым моментом при цилиндрическом и сферическом изгибах

М. В. Азаров

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
Российская Федерация, Зеленоград*

Аннотация. Представлены результаты численного исследования конформных свойств тонкопленочной отражающей метаповерхности, формирующей орбитальный угловой момент (ОУМ) для снижения моностатического обратного рассеяния. Полноволновое моделирование в CST Studio Suite выполнено для плавного цилиндрического (одна ось) и сферического (две оси) изгибов с радиусами от ∞ до $2,5\lambda$, а также для наклонного падения плоской волны с левой круговой поляризацией в диапазоне частот 9–10 ГГц. Сравнение с эталонной метаповерхностью, содержащей те же метаатомы без азимутальных поворотов, позволило выделить вклад ОУМ профиля. Показано, что характерный провал интенсивности в диаграмме обратного рассеяния сохраняется вплоть до радиуса $2,5\lambda$, а при радиусах $\geq 4\lambda$ подавление составляет не менее 10 дБ. При наклонном падении до 60° максимальное снижение обратного рассеяния достигает 23 дБ без возникновения дополнительных боковых лепестков. Результаты подтверждают робастность фазового распределения ОУМ к геометрическим искажениям и возможность применения таких метаповерхностей в качестве покрытий для поверхностей двойной кривизны.

Ключевые слова: метаповерхность, ОУМ, орбитальный угловой момент, снижение обратного рассеяния, тонкопленочная метаповерхность, конформность.

Цитирование: Азаров М. В. Исследование снижения обратного рассеяния конформной метаповерхности с орбитальным угловым моментом при цилиндрическом и сферическом изгибах / М. В. Азаров // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(6). С. 793–802. EDN: KHYHQX

Введение

Управление электромагнитным полем с помощью искусственных материалов с уникальными характеристиками – метаматериалов – является перспективным и активно развивающимся направлением, находящимся на стыке современных радиотехники и радиофизики. Отдельное направление и, в частности, задача управления обратным рассеянием зачастую заключаются в формировании волновых фронтов сложной структуры, что осуществимо при помощи отражающих метаповерхностей [1]. Такие плоские метаструктуры имеют неоспоримые преимущества перед классическими подходами по уменьшению обратного рассеяния отраженных волн в части массогабаритных характеристик [2] и конформности, то есть возможности сохранения своих свойств при определенных геометрических преобразованиях. Пассивные метаповерхности конвертируют и перераспределяют энергию падающей электромагнитной волны в боковые направления и, следовательно, уменьшают мощность, отраженную в направлении источника исходной волны. Особо интересны метаповерхности, формирующие отраженные волны с ненулевым орбитальным угловым моментом (ОУМ) [3], так как наличие фазовой сингулярности на оси распространения такого квазиоптического волнового пучка обеспечивает глубокий провал

интенсивности в диаграмме рассеяния, что делает такие метаповерхности с ОУМ перспективным инструментом снижения моностатического обратного рассеяния.

Как было упомянуто ранее, значительный прогресс в данной задаче был достигнут благодаря развитию концепции метаповерхностей, и, несмотря на различные подходы в части проектирования фазового профиля [4, 5], задающего распределение комплексного коэффициента отражения, у получаемых структур отдельно необходимо выделить способность сохранять свои свойства при использовании их на поверхностях различной кривизны. В большинстве научных работ рассматриваются сугубо планарные [6, 7] или цилиндрические структуры [8], тогда как реальная геометрия, на которой может потенциально применяться тонкопленочная метаповерхность, может иметь двойную кривизну. Это порождает актуальную научно-практическую задачу: исследование радиотехнических свойств фазового распределения, синтезированного для формирования волн с ОУМ, при размещении метаповерхности на искривленной поверхности.

В связи с изложенным цель статьи заключается в исследовании поведения метаповерхности с ОУМ при плавном изгибе по одной и по двум осям. Для оценки будет проводиться сравнение с эталонной метаповерхностью, которая содержит те же метаатомы в том же количестве и на той же подложке, но ориентированные одинаково, то есть с однородным фазовым профилем. Такой подход позволит выявить влияние именно фазового распределения ОУМ на фоне искажений, вносимых кривизной. Исследование будет проводиться посредством полномасштабного моделирования в CST Studio Suite.

Моделирование изгибов метаповерхностей с ОУМ

В рамках данного исследования будут рассмотрены следующие случаи:

- отклонение направления падения плоской волны от нормали метаповерхности – наклон без измерения формы поверхности;
- изгиб метаповерхности вдоль одной оси – цилиндрическое преобразование;
- изгиб метаповерхности одновременно вдоль двух перпендикулярных осей – сферическое преобразование.

Как было отмечено, для сравнения полномасштабное моделирование будет проводиться с парными метаповерхностями: эталонной и генерирующей ненулевой ОУМ, что позволит оценить влияние задаваемого фазового профиля, исключая эффекты, создаваемые самой метаповерхностью.

Подробное описание синтеза метаатома, генерирующего волны с ОУМ фазового профиля и тонкопленочной метаповерхности, представлено в работе [9]. Используемые в исследовании метаповерхности представлены на рис. 1.

Размер каждой метаповерхности 180x180x2,5 мм, что с точки зрения относительной толщины для длины волны в свободном пространстве на рабочей частоте 10 ГГц составляет менее 0,1 длин волн. Моделирование проводилось в CST Studio Suite со следующими условиями: источник излучения – волна с плоским фронтом и левой круговой поляризацией на частоте 10 ГГц; решатель – частотная область с тетраэдрической сеткой; результат – суммарный по поляризациям уровень обратного рассеяния в передней полусфере. Результаты моделирования получены в рабочем диапазоне частот от 9 до 10 ГГц.

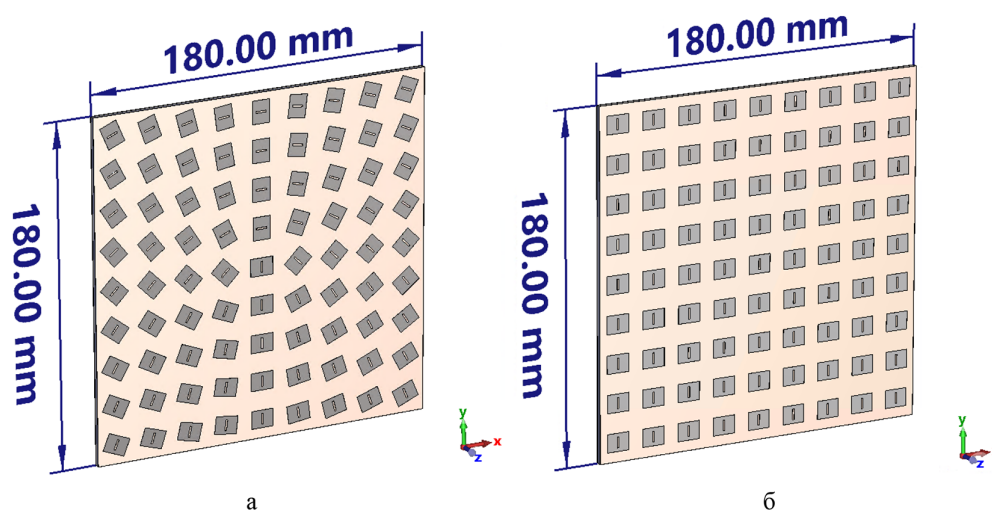


Рис. 1. Внешний вид и размеры метаповерхностей: а – метаповерхность с ОУМ; б – эталонная метаповерхность

Fig. 1. Appearance and dimensions of metasurfaces: a – metasurface with OAM; b – reference metasurface

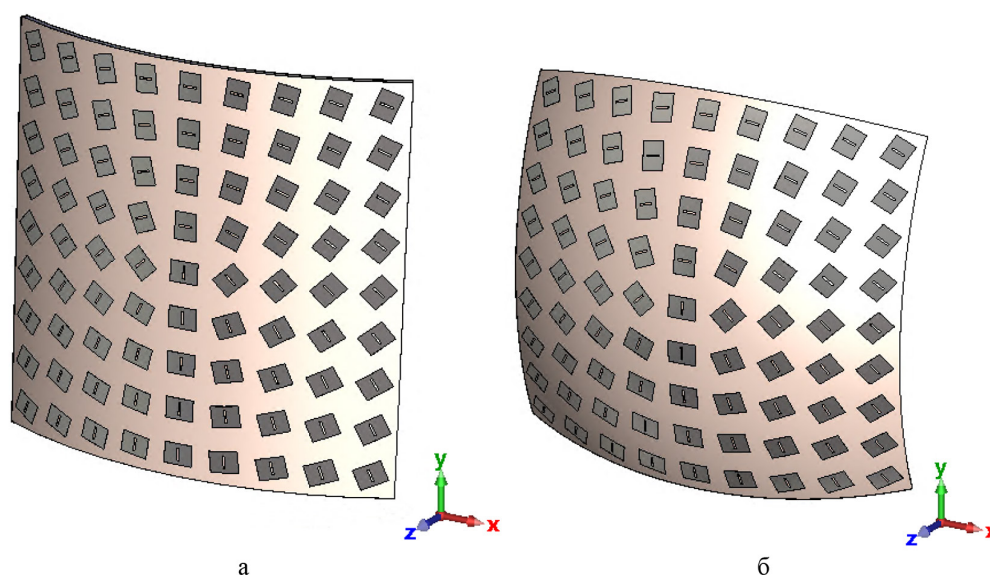


Рис. 2. Внешний вид изогнутых метаповерхностей: а – изгиб вдоль одной оси Ox с радиусом 180 мм (6 длин волн); б – изгиб вдоль осей Ox и Oy с радиусами 180 мм (6 длин волн)

Fig. 2. Appearance of curved metasurfaces: a – bending along one Ox axis with a radius of 180 mm (6 wavelengths); b – bending along the Ox and Oy axes with radii of 180 mm (6 wavelengths)

Углы поворота метаповерхности были выбраны от 0 до 60 градусов с шагом 10 градусов. Радиусы скруглений были выбраны следующие: ∞ , 300, 240, 180, 120, 75 мм, что соответствует плоскому варианту, 10, 8, 6, 4 и 2,5 длин волн. На рис. представлен внешний вид метаповерхностей с радиусами изгиба 180 мм (6λ).

Результаты моделирования

Для количественной оценки влияния фазового профиля ОУМ с учетом представленных геометрических искажений используется рассчитанная эффективная площадь рассеяния. Снижение обратного рассеяния в каждой конфигурации определяется как разность рассчитанных значений эталонной и метаповерхности с ОУМ. Таким образом, положительные значения снижения обратного рассеяния соответствуют подавлению по сравнению с эталоном, а отрицательные – возрастанию.

Далее на рис. 3, представлены диаграммы обратного рассеяния на частоте 10 ГГц для углов падения от 0 до минус 60 градусов с шагом минус 20 градусов.

Из представленных результатов видно, что эффект формирования провала в отраженном лепестке на диаграмме рассеяния сохраняется до угла падения минус 60 градусов. При этом средний уровень боковых лепестков соизмерим с эталонной метаповерхностью, не возникает дополнительных побочных лепестков. Сведенные результаты по изменению уровня обратного рассеяния в зависимости от частоты и угла падения плоской волны представлены на рис. .

Как было упомянуто ранее, для углов менее минус 60 градусов для отраженного лепестка обеспечивается снижение обратного рассеяния от 0 до 23 дБ, в то время как по направлению падения отраженной волны изменение обратного рассеяния находится в диапазоне от минус 5 до 5 дБ. Это свидетельствует о невысокой чувствительности фазового профиля с ОУМ к наклону падающей волны.

Далее на рис. – представлены диаграммы обратного рассеяния на частоте 10 ГГц для радиусов скруглений 10λ , 6λ и $2,5\lambda$.

Из представленных результатов видно, что характерный для волн с ОУМ провал интенсивности на оси распространения сохраняется до радиусов скруглений $2,5\lambda$ (75 мм), при этом, как и в случае с отклонением падающей волны и плоской метаповерхности, не возникают дополни-

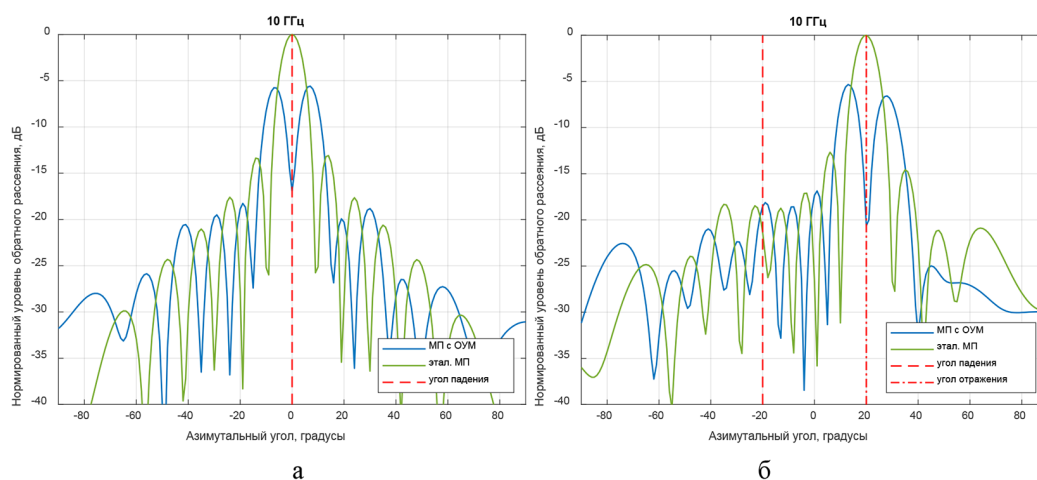


Рис. 3. Диаграммы обратного рассеяния на частоте 10 ГГц в сечении 0° угла места: а – для угла падения 0° ; б – для угла падения -20°

Fig. 3. Backscattering diagrams at a frequency of 10 GHz in the cross section of the 0° angle of the location: а – for the angle of incidence of 0° ; б – for the angle of incidence -20°

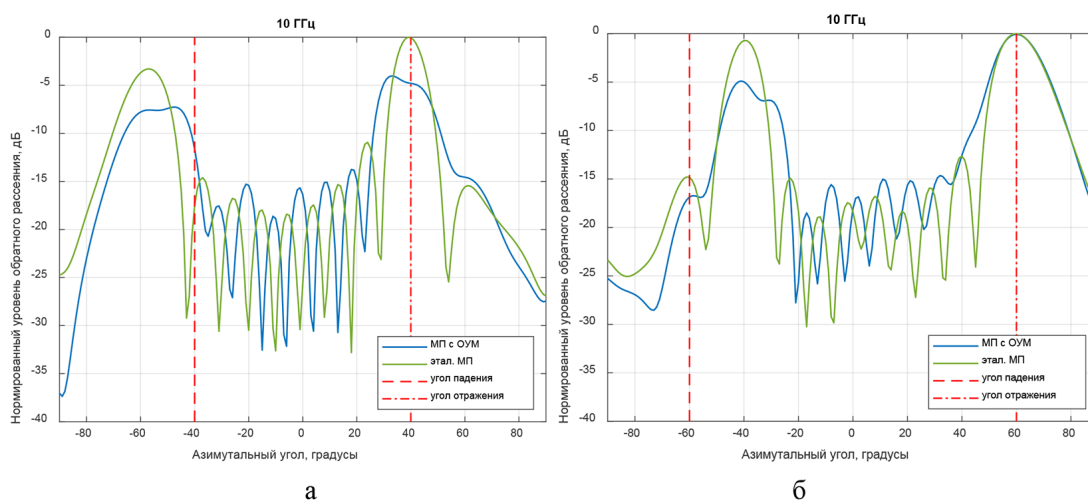


Рис. 4. Диаграммы обратного рассеяния на частоте 10 ГГц в сечении 0° угла места: а – для угла падения -40° ; б – для угла падения -60°

Fig. 4. Backscattering diagrams at a frequency of 10 GHz in the cross section of the 0° angle of the location: a – for the angle of incidence of -40° ; b – for the angle of incidence -60°

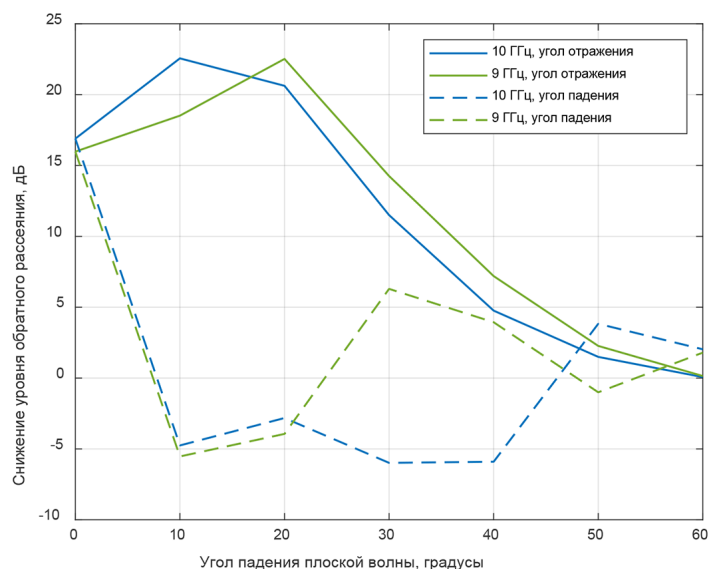


Рис. 5. Уровень снижения обратного рассеяния в зависимости от угла падения для двух направлений – угол падения и угол отражения

Fig. 5. The level of backscattering reduction depending on the angle of incidence for two directions – the angle of incidence and the angle of reflection

тельные побочные лепестки, а средний уровень боковых соизмерим с эталонной. Обобщенные результаты по изменению уровня обратного рассеяния в зависимости от частоты и различных искривлений представлены на рис. .

Результаты моделирования позволяют судить о робастности представленной метаповерхности с ОУМ, так как независимо от искажений исходной геометрии сохраняется уро-

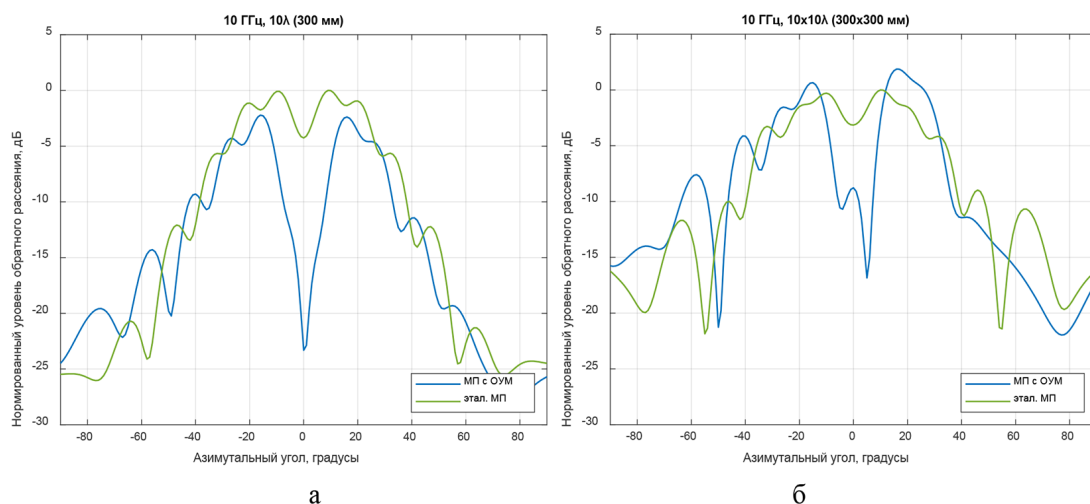


Рис. 6. Диаграммы обратного рассеяния на частоте 10 ГГц в сечении 0° угла места: а – для одного радиуса скругления 10λ ; б – для двух радиусов скруглений 10λ .

Fig. 6. Backscattering diagrams at a frequency of 10 GHz in the cross section of the 0° angle of the location: a – for one radius of rounding 10λ ; b – for two radii of rounding 10λ .

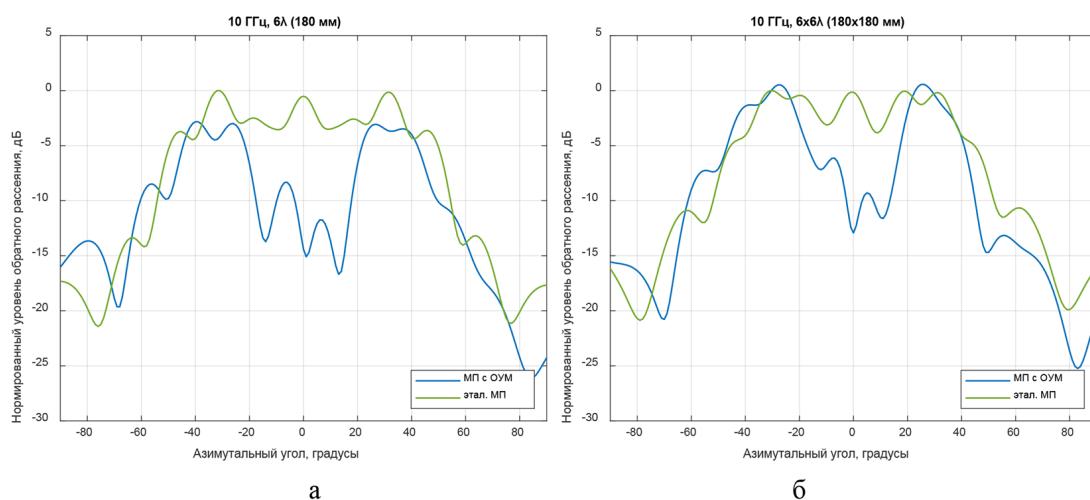


Рис. 7. Диаграммы обратного рассеяния на частоте 10 ГГц в сечении 0° угла места: а – для одного радиуса скругления 6λ ; б – для двух радиусов скруглений 6λ .

Fig. 7. Backscattering diagrams at a frequency of 10 GHz in the cross section of the 0° angle of the location: a – for one radius of rounding 6λ ; b – for two radii of rounding 6λ .

вень снижения обратного рассеяния до радиусов $2,5\lambda$. При этом для радиусов изгибов до 4λ сохраняется способность уменьшать обратное рассеяние на уровне 10 дБ. Сравнение кривых для одноосного и двухосного изгибов показывает, что для радиусов более 4λ зависимость практически идентична, тогда как заметное отличие возникает при радиусах порядка $2,5\lambda$, где сферическая деформация приводит к дополнительному ухудшению подавления по сравнению с цилиндрической. Тем не менее выраженный провал интенсивности сохраняется для

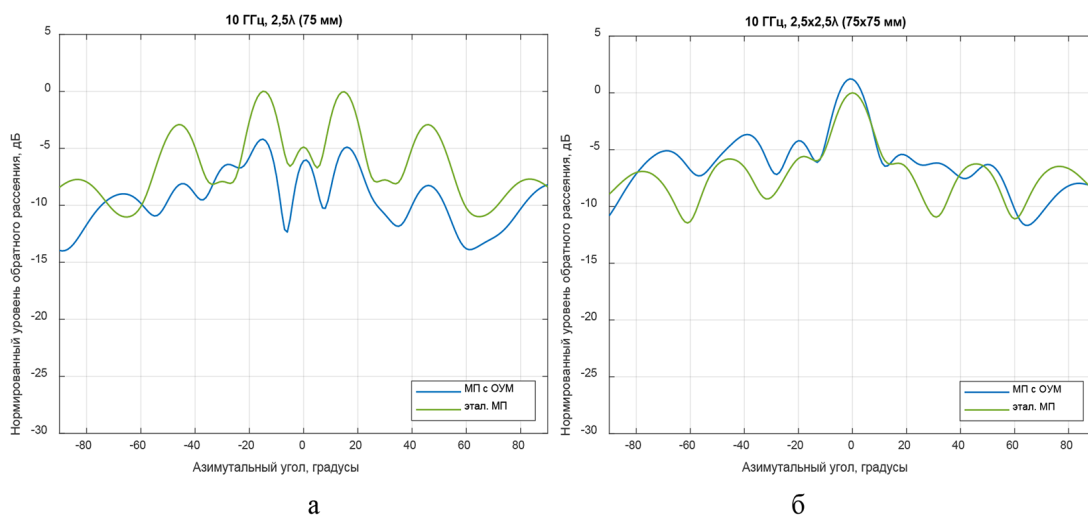


Рис. 8. Диаграммы обратного рассеяния на частоте 10 ГГц в сечении 0° угла места: а – для одного радиуса скругления $2,5\lambda$; б – для двух радиусов скруглений $2,5\lambda$.

Fig. 8. Backscattering diagrams at a frequency of 10 GHz in the cross section of the 0° angle of the location: а – for one radius of rounding 2.5λ ; б – for two radii of rounding 2.5λ .

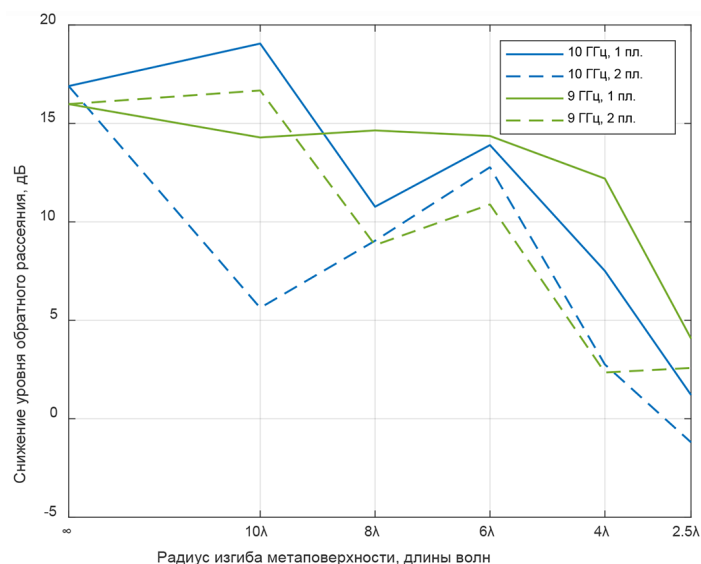


Рис. 9. Уровень снижения обратного рассеяния в зависимости от радиусов изгиба в одной и двух осях (плоскостях)

Fig. 9. The level of backscattering reduction depending on the bending radii in one and two axes (planes)

больших значений радиусов, что говорит о конформности рассмотренного типа метаповерхности.

Продemonстрированная устойчивость провала интенсивности обратного рассеяния обусловлена тем, что фазовое распределение для формирования ОУМ реализовано исключительно за счет геометрической фазы, которая не зависит от локального набег фазы при распро-

странении. Небольшой плавный изгиб метаповерхности вносит изменение в электрические расстояния от метаатомов до исходной апертуры метаповерхности, что эквивалентно появлению квадратичной и астигматической фазовых aberrаций. Пока радиус кривизны существенно превышает размер метаповерхности, амплитуда этих aberrаций в раскрыве мала по сравнению с формируемым амплитудно-фазовым распределением, и, таким, образом условие деструктивной интерференции на оси квазиоптического ОУМ пучка сохраняется. Моделирование показало, что при радиусах порядка $2,5\lambda$ aberrации становятся соизмеримыми с полезным фазовым градиентом, что приводит к сильному увеличению интенсивности отраженной волны на оси распространения.

С точки зрения практического применения полученные результаты означают, что представленная метаповерхность, реализованная по описанной методике [1], может без изменений наноситься на цилиндрические и сферические поверхности с радиусом кривизны вплоть до 4λ при сохранении снижения обратного рассеяния до 10 дБ. При этом выявлено ограничение при наклонном падении: частичная эффективность сохраняется до углов отклонения 60 градусов. Дальнейшее исследование целесообразно в части модификации фазового профиля с ОУМ для лучшего сохранения ключевых параметров при использовании на криволинейных поверхностях.

Выводы

По результатам выполненного полноволнового моделирования конформной тонкопленочной метаповерхности, формирующей отраженные волны с ненулевым ОУМ, можно сделать следующие выводы.

1. Фазовое распределение с ОУМ, синтезированное для планарной метаповерхности, формирует провал обратного рассеяния при отклонении падающей волны от нормали вплоть до углов 60 градусов, при этом максимальное снижение обратного рассеяния относительно эталонной метаповерхности без ОУМ достигает 23 дБ.
2. При плавном изгибе вдоль одной оси – цилиндрическое преобразование – характерный провал интенсивности на оси квазиоптического пучка сохраняется для радиусов изгиба вплоть до $2,5\lambda$; при радиусах более 4λ обеспечивается снижение обратного рассеяния не менее чем на 10 дБ.
3. При плавном изгибе вдоль двух перпендикулярных осей – сферическое преобразование – происходит дополнительное ухудшение по сравнению с одноосным изгибом, которое становится значимо только при радиусах порядка $2,5\lambda$, не препятствуя при этом формированию провала в интенсивности на оси распространения.
4. Во всех рассмотренных случаях не наблюдается появления дополнительных побочных лепестков на диаграммах рассеяния, при этом средний уровень боковых лепестков метаповерхности с ОУМ соизмерим с эталоном, что подтверждает перераспределение энергии отраженной волны за счет формирования ОУМ волны, а не вследствие разностного рассеяния.
5. Полученные результаты демонстрируют принципиальную возможность использования тонкопленочных метаповерхностей с ОУМ в качестве покрытий для снижения уровня обратного рассеяния, в том числе на поверхностях с двойной кривизной.

Список литературы / References

- [1] Joy V. et al. Metasurfaces for stealth applications: A comprehensive review. *Journal of electronic materials*, 2021, 50(6), 3129–3148.
- [2] Ullah M. U. et al. A progression in the techniques of reducing RCS for the targets. *Alexandria Engineering Journal*, 2024, 100, 153–169.
- [3] Zhou Z. et al. Research on Rcs Reduction and Oam Vortex Beam Generation Based on Terahertz Ring-Shaped Polarization Converter. *Available at SSRN 4210221*, 2022.
- [4] Cui T. J. et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials. *Light: science & applications*, 2014, 3(10), e218-e218.
- [5] Murugesan A. et al. A review of metasurface-assisted RCS reduction techniques. *Progress In Electromagnetics Research B.*, 2021.
- [6] Su P. et al. An ultra-wideband and polarization-independent metasurface for RCS reduction. *Scientific reports*, 2016, 6(1), 20387.
- [7] Semenikhin A. I., Semenikhina D. V., Zikina A. M. Wide-Angle Cancellation of Scattering from Hybrid PB-Metasurfaces with Combined Phase OAM-Profiles. *IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC)*, 2024, 477–480.
- [8] Semenikhin A. I., Semenikhina D. V. Conformal Prismatic Cylindrical Metasurfaces Containing Identical OAM–Modules for RCS Reduction. *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, 2023, 300–303.
- [9] Yury M. Meleshin, Maxim V. Azarov, Artem A. Airapetian, Konstantin S. Lyalin, Orbital angular momentum generating thin-film conformal metasurface for backscattering control. *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*, 2026, 70, 101519, ISSN 1569–4410.

Radio Location & Radio Navigation
Радиолокация и радионавигация

EDN: FCYORK

УДК 528.8

**Mapping Soil Eluviation-Accumulation Zones Based
on Unmanned and Satellite Data:
A Case Study of Agricultural Lands of the EPF “Kuraginskoye”
of the Federal Research Center KSC SB RAS**

**Irina Yu. Botvich*, Artem P. Snitserev,
Mark I. Rachinskiy and Anatolii P. Shevyrnogov**
*Institute of Biophysics SB RAS
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 04.06.2026, received in revised form 01.07.2026, accepted 15.07.2026

Abstract. We constructed maps of eluvial-accumulative zones for agricultural lands at the EPF “Kuraginskoye” of the Federal research center KSC SB RAS, using remote sensing data (unmanned and satellite). It has been established that using maps of eluvial-accumulative zones of agricultural soils obtained from unmanned aerial vehicle data allows us to determine the causes of increased or decreased fertility. Zones with different eluvial-accumulative potential of soils were identified: zones of maximum and moderate accumulation, transition zones, and eluvial zones. The mesorelief and microrelief of the agricultural lands were assessed using unmanned data. It has been established that digital elevation models (DEMs) of agricultural lands derived from drone data are essential for solving precision farming problems. Existing open-access satellite DEMs, in particular FABDEM, have insufficient spatial resolution to solve these problems.

Keywords: DEM, unmanned aerial vehicle and satellite data, agricultural land, precision farming.

Acknowledgements. The study was carried out as part of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation – FWES-2024–0032 “The Influence of the Structural, Dynamic, and Optical Characteristics of Chloroplasts on the Productivity of Agricultural Plants”

Citation: Botvich I. Yu., Snitserev A. P., Rachinskiy M. I., Shevyrnogov A. P. Mapping Soil Eluviation-Accumulation Zones Based on Unmanned and Satellite Data: A Case Study of Agricultural Lands of the EPF “Kuraginskoye” of the Federal Research Center KSC SB RAS. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(6), 803–812. EDN: FCYORK



Построение карт элювиально-аккумулятивных зон почв по беспилотным и спутниковым данным на примере сельскохозяйственных угодий ОПХ “Курагинское” ФИЦ КНЦ СО РАН

И. Ю. Ботвич, А. П. Сницеров,
М. И. Рачинский, А. П. Шевырнов
*Институт биофизики СО РАН
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. Проведено построение карт элювиально-аккумулятивных зон почв сельскохозяйственных угодий ОПХ “Курагинское” ФИЦ КНЦ СО РАН по данным дистанционного зондирования (беспилотным и спутниковым). Установлено, что использование карт элювиально-аккумулятивных зон почв сельскохозяйственных угодий, полученных по беспилотным данным, позволяет определить причины повышенного или пониженного плодородия. Определены зоны с различным элювиально-аккумулятивным потенциалом почв: зоны максимального и умеренного накопления, транзитные и элювиальные зоны. Выполнена оценка мезорельефа и микрорельефа сельскохозяйственных угодий по беспилотным данным. Установлено, что для решения задач точного земледелия необходимо использовать цифровые модели рельефа (ЦМР) сельскохозяйственных угодий, полученные по беспилотным данным. Существующие в открытом доступе спутниковые ЦМР, в частности FABDEM, имеют недостаточное пространственное разрешение для решения указанных задач.

Ключевые слова: ЦМР, беспилотные и спутниковые данные, сельскохозяйственные угодья, точное земледелие.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ – FWES-2024–0032 “Влияние структурных, динамических и оптических характеристик хлоропластов на продуктивность сельскохозяйственных растений”.

Цитирование: Ботвич И. Ю. Построение карт элювиально-аккумулятивных зон почв по беспилотным и спутниковым данным на примере сельскохозяйственных угодий ОПХ “Курагинское” ФИЦ КНЦ СО РАН / И. Ю. Ботвич, А. П. Сницеров, М. И. Рачинский, А. П. Шевырнов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(6). С. 803–812. EDN: FSYORK

Введение

Современное сельское хозяйство стоит перед решением задачи увеличения производства продовольствия в связи с постоянным ростом населения и минимизацией нагрузки на окружающую среду [1, 2]. Внедрение методов точного земледелия (precision agriculture) позволяет повысить урожайность сельскохозяйственных культур, снизить себестоимость продукции и уменьшить антропогенную нагрузку.

При традиционном ведении хозяйства все агротехнические мероприятия (посев, внесение удобрений, пестицидов, орошение и т.д.) проводятся одинаково по всему полю. Использование методов точного земледелия предполагает дифференцированный подход к различным зонам в пределах одного поля. Данные методы базируются на анализе внутривидовой неоднородности сельскохозяйственных угодий. Перед разработчиками методов точного земледелия стоят задачи пространственного зонирования полей и определения причин, обуславливающих формирование зон.

Рельеф ландшафтов земледельческой части Средней Сибири преимущественно равнинный, местами увалистый, увалисто-холмистый с волнистыми и платообразными водоразделами, с пологими, слабопокатыми и покатыми склонами [3]. Склоновый характер рельефа на этих территориях обуславливает делювиальные и эрозионные процессы, которые приводят к смещению и смешиванию пород разного генезиса, а также к смыву и выдуванию мелкозема [4]. Например, в Красноярском крае на склонах от 1 до 3° расположено 47 % пахотных земель, до 5° – 14,5 %, до 7° и более – 9,9 % [3].

Основными факторами, влияющими на варьирование содержания гумуса почвы в склоновом рельефе, являются экспозиция склонов и уклон. Установлена высокая зависимость содержания гумуса пахотного слоя почвы от экспозиции и крутизны склона ($R_{\text{MN}} = 0,72$) [5].

Эрозионные процессы приводят к снижению содержания гумуса в почве и, как следствие, к увеличению площади малогумусных контуров. Так, в работе Г.П. Глазунова и соавторов показано, что на исследуемом ими участке произошло перераспределение гумусового вещества со склона с частичной его аккумуляцией в замкнутых понижениях северной части склона [5].

Традиционным источником данных о рельефе территорий являются спутниковые радарные данные ASTER, AW3D 30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, NASADEM и др. [6–8]. Но эти данные обладают определенными ограничениями – недостаточное пространственное разрешение и наличие ошибок на участках со сложным рельефом, что делает их непригодными для внутриполевого анализа сельскохозяйственных угодий. Для решения задач точного земледелия наиболее эффективным является использование ЦМР (цифровой модели рельефа), построенной по результатам аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов методом фотограмметрии. Беспилотные технологии позволяют получать данные высокого пространственного разрешения и обеспечивают высокую оперативность проводимых работ на исследуемых территориях.

Цель: разработка метода построения карт элювиально-аккумулятивных зон почв по данным дистанционного зондирования для решения задач точного земледелия.

Материалы и методика

Исследования проводились на землях ОПХ «Курагинское ФИЦ КНЦ СО РАН. ОПХ «Курагинское» расположено в Курагинском районе Красноярского края, площадь исследуемой территории в 2025 г. составила 18 000 га.

Исследования основываются на данных беспилотной съемки, спутниковых и наземных измерений. Беспилотные съемки выполнены с помощью Геоскан-201 Агро RGB-камерой Sony RX1RM2 в 2022 г. и 2025 г. [9, 10]. Фотограмметрическая обработка проводилась в Agisoft Metashape. После выполнения фототриангуляции с самокалибровкой общая ошибка (на опорных и контрольных точках) не превышала 7 см. В результате проведенных обработок получены ортофотопланы RGB-съемки с пространственным разрешением 8,5 см и цифровые модели рельефа с пространственным разрешением 17 см. В исследовании использовались данные по съемкам 2025 г. по всем полям ОПХ, кроме полей №№ 34, 35, 36 (для данных полей использовались данные съемок 2022 г.).

Для оценки ЦМР по спутниковым данным применялись данные FABDEM (Forest And Building remove Copernicus DEM) [11]. Данная ЦМР получена путем удаления деревьев и зда-

ний из модели Copernicus GLO-30. Пространственное разрешение – 1 угловая секунда (около 30 м на экваторе). Вертикальная точность FABDEM $RMSE = 2.06$ m [11].

Расчет морфометрических параметров ЦМР (slope, aspect, total catchment area, MRRTF, MRVBF, LS Factor) выполнялся с помощью ГИС SAGA. Программное обеспечение SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses) – это платформа, предоставляющая набор модулей для анализа данных дистанционного зондирования [12].

Результаты и их обсуждение

В 2022 г. сотрудниками Лаборатории экологической информатики ИБФ СО РАН впервые в истории ОПХ «Курагинское» ФИЦ КНЦ СО РАН проведена беспилотная съемка всех сельскохозяйственных угодий [13]. Площадь съемки в 2022 г. составила 15 000 га. К 2025 г. площадь сельскохозяйственных угодий значительно увеличилась, в связи с чем произведена повторная съемка всех угодий ОПХ, включая новые поля – всего 18 000 га. На рис. 1 представлен ортофотоплан ОПХ «Курагинское» ФИЦ КНЦ СО РАН с контурами полей в 2025 г.

На рис. 1 представлены цифровые модели рельефа ОПХ «Курагинское» ФИЦ КНЦ СО РАН, построенные по беспилотным (в) и спутниковым (б, г) данным. В результате сравнения

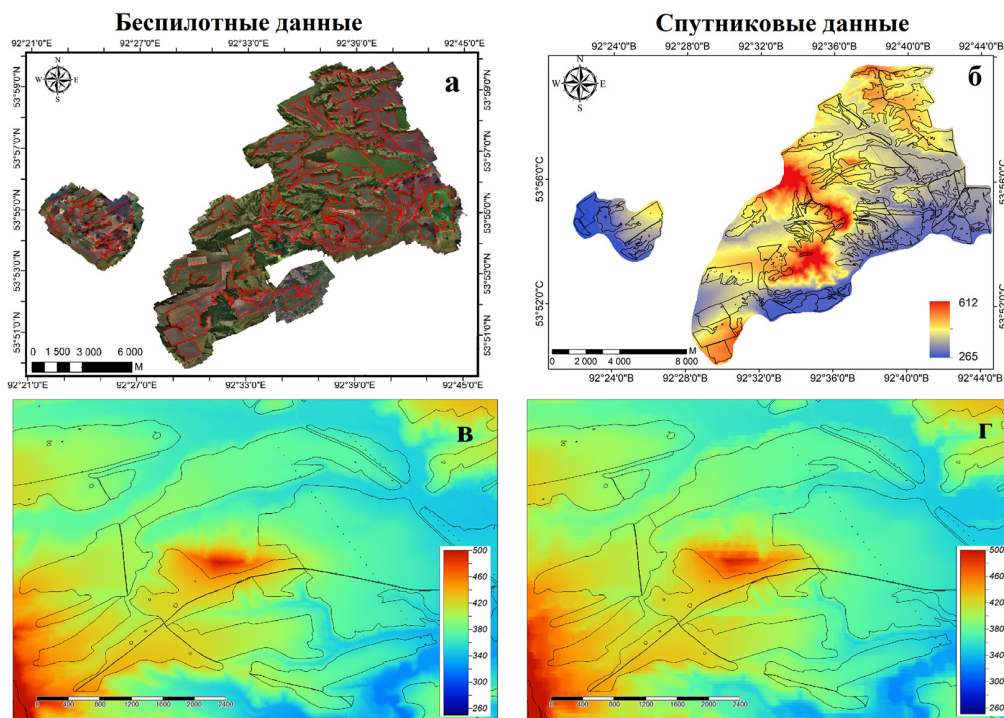


Рис. 1. Беспилотные и спутниковые данные ОПХ «Курагинское» ФИЦ КНЦ СО РАН с контурами полей в 2025 г.: а – ортофотоплан ОПХ, построенный по беспилотным данным; б – спутниковая ЦМР карта ОПХ; в – ЦМР полей по беспилотным данным; г – ЦМР полей по спутниковым данным

Fig. 1. Unmanned aerial vehicle and satellite data of the EPF “Kuraginskoye” of the federal research center KSC SB RAS, showing field contours in 2025: a – Orthophotomap of the EPF based on unmanned aerial vehicle data; b – Satellite DEM map of the EPF; c – Field DEM based on unmanned aerial vehicle data; d – Field DEM based on satellite data

беспилотных и спутниковых данных установлено, что беспилотные данные существенно превосходят спутниковые по детализации и точности. Беспилотные данные с сантиметровым пространственным разрешением позволяют оценивать не только мезорельеф, но и микрорельеф полей.

Авторами данного исследования разработан уникальный метод построения карт плодородия сельскохозяйственных полей по беспилотным и спутниковым данным [9]. Предложенный метод позволяет определять зоны повышенного и пониженного плодородия. Используя полученные сведения о состоянии поля, производится построение карт-заданий для дифференцированного внесения внутрипочвенных удобрений, что обеспечивает оптимизацию использования агрохимических средств и снижение антропогенной нагрузки на агроландшафты. Результаты проведенных исследований показали, что доля устойчивых зон повышенного и пониженного плодородия в пределах отдельно взятого поля составляет от 4 до 28 % от его общей площади. Это означает, что на протяжении нескольких лет определенные участки поля сохраняют статус зон “повышенного” или “пониженного” плодородия, несмотря на ежегодное внесение удобрений и проводимые агротехнические мероприятия. Основной причиной этого являются особенности мезорельефа поля, а именно характер кривизны склонов, экспозиции, крутизны и формы поверхности, которые определяют перераспределение твердого стока и влаги. Вогнутые элементы мезорельефа формируют зоны аккумуляции мелкозема и влаги, что способствует накоплению органического вещества и элементов минерального питания, тогда как выпуклые и приводораздельные участки служат транзитными зонами либо очагами смыва, что приводит к обеднению почвенного профиля.

Определение причин формирования зон с различным уровнем плодородия является важнейшим шагом в понимании процессов перераспределения вещества в агроландшафте. Традиционные исследования водной и ветровой эрозии на сельскохозяйственных полях фокусируются на определении участков, подверженных смыву почвы и потере наиболее плодородного горизонта [14–18]. Однако за рамками исследований остаются вопросы определения зон накопления и транзита твердого стока. Многолетнее действие эрозионно-аккумулятивных процессов приводит к формированию элювиально-аккумулятивных зон: зон максимального и умеренного накопления, транзитных и элювиальных зон.

Авторами данной работы разработан метод определения элювиально-аккумулятивных зон по беспилотным и спутниковым данным. Зонирование поверхности производится на основании анализа морфометрических параметров ЦМР. На рис. 2 представлены результаты построения карт элювиально-аккумулятивных зон почв ОПХ «Курагинское» по беспилотным и спутниковым данным.

Рассмотрим более подробно карты элювиально-аккумулятивных зон почв полей №№ 8, 9 и 10, построенные по беспилотным (а) и спутниковым (б) данным (рис. 3). Представленная карта включает четыре зоны, обозначенные разным цветом:

- зоны максимального накопления обозначены – зеленым цветом,
- умеренного накопления – синим,
- транзитные зоны – желтым,
- элювиальные зоны – красным.

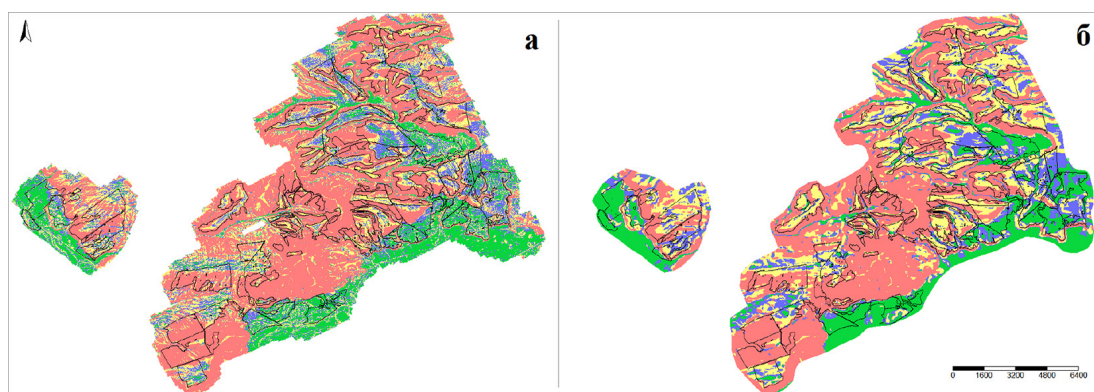


Рис. 2. Карта элювиально-аккумулятивных зон почв по беспилотным (а) и спутниковым (б) данным. Зоны максимального накопления обозначены – зеленым цветом, умеренного накопления – синим, транзитные зоны – желтым, элювиальные зоны красным цветом. Черным контуром обозначены границы сельскохозяйственных полей

Fig. 2. Map of eluvial-accumulative soil zones based on unmanned aerial vehicle (a) and satellite (b) data. Zones of maximum accumulation are shown in green, zones of moderate accumulation are shown in blue, transition zones are shown in yellow, and eluvial zones are shown in red. The boundaries of agricultural fields are shown in black

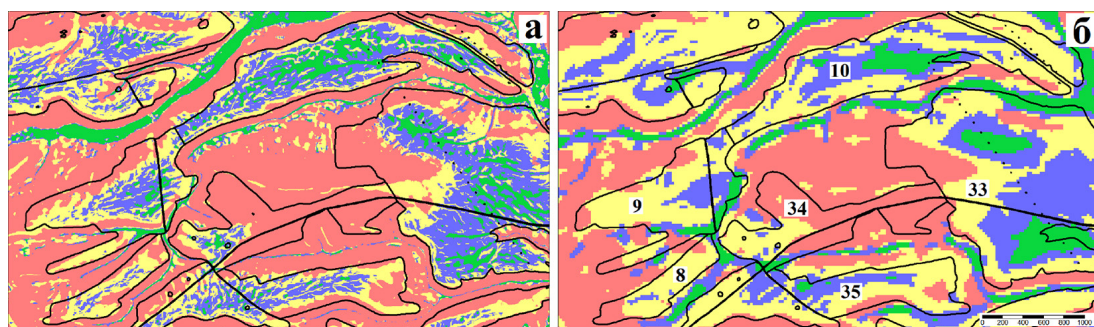


Рис. 3. Фрагмент карты элювиально-аккумулятивных зон почв по беспилотным (а) и спутниковым (б) данным полей ОПХ «Курагинское», представленной на рис. 2. Зоны максимального накопления обозначены зеленым цветом, умеренного накопления – синим, транзитные зоны – желтым, элювиальные зоны – красным. Черным контуром обозначены границы сельскохозяйственных полей

Fig. 3. A fragment of the map of eluvial-accumulative soil zones based on unmanned aerial vehicle (a) and satellite (b) data from the EPF “Kuraginskoye”, shown in Figure 2. Zones of maximum accumulation are shown in green, moderate accumulation in blue, transition zones in yellow, and eluvial zones in red. The boundaries of agricultural fields are outlined in black

Зоны максимального накопления включают днища ложбин, логов, балок, замкнутые понижения. В данных зонах происходит интенсивное накопление аллювиальных и делювиальных отложений; формирование мощных (иногда погребённых) почвенных профилей [19].

Зоны умеренного накопления – расположены в нижней части склонов (подошвы), конусы выноса, выположенные участки у основания склонов. В данных зонах идет преобладание аккумуляции делювиальных и пролювиальных наносов над выносом; положительный баланс наносов; осаждение мелкозема и органики [14].

Транзитные зоны – включают срединные части склонов с прямолинейным или слабоогнутым профилем. Это зоны устойчивого переноса материала, баланс наносов близок к нулю, смыв компенсируется привнесом с вышележащих участков [20].

Элювиальные зоны – включают выпуклые и прямые участки склонов (вершины, бровки, верхние трети склонов), области генерации поверхностного стока. Доминирование плоскостной и линейной эрозии, характерен отрицательный баланс наносов. Происходит активный вынос мелкозема и органического вещества [14–18].

В результате сравнения элювиально-аккумулятивных зон почв, построенных по беспилотным и спутниковым данным, установлено, что именно беспилотные данные позволяют обеспечить высокую детализацию полученных карт, требуемую для решения задач точного земледелия. Высокое пространственное разрешение беспилотных данных позволяет оценивать участки с линейными размерами от нескольких метров. Это, в свою очередь, позволяет достоверно выявлять и картировать пространственные неоднородности почвенного покрова в пределах отдельного поля и в том числе определять причины формирования зон повышенного или пониженного плодородия.

В отличие от беспилотных данных, спутниковые данные FABDEM не фиксируют ключевые элементы мезорельефа, определяющие пространственную неоднородность почвенного плодородия в пределах поля. Поэтому данные FABDEM могут быть успешно использованы только для анализа общих эрозионно-аккумулятивных процессов – в масштабах отдельного сельскохозяйственного предприятия или более крупной территории (водосборного бассейна, административного района и т.д.).

Заключение

Разработана научно-методическая основа для пространственного зонирования агроландшафтов. Построение и анализ карт элювиально-аккумулятивных зон почв позволяет определять причины пространственной вариабельности агрохимических свойств почв и, как следствие, определять причины повышенного или пониженного плодородия.

Установлено, что для решения задач точного земледелия необходимо использовать цифровые модели рельефа (ЦМР) сельскохозяйственных угодий, полученные по беспилотным данным. Существующие в открытом доступе спутниковые ЦМР, в частности FABDEM, имеют недостаточное пространственное разрешение для решения указанных задач.

В результате проведенных исследований разработан метод построения карт элювиально-аккумулятивных зон почв. Проведено построение карт элювиально-аккумулятивных зон сельскохозяйственных угодий ОПХ “Курагинское” ФИЦ КНЦ СО РАН по беспилотным и спутниковым данным. Выполнена оценка мезорельефа сельскохозяйственных угодий по беспилотным данным. Определены зоны с различным элювиально-аккумулятивным потенциалом: зоны максимального и умеренного накопления, транзитные и элювиальные зоны.

Список литературы / References

[1] Mashori A.S., Li F., Aman M., Zhang W., Jia S., Ali A., Jabeen N., Hao W., Yan Y. Remote Sensing through UAVs for Precision Agriculture: Applications, Technical Foundations, Current Barriers, and Future Opportunities. *Smart Agricultural Technology Available*, 2026, 102074

- [2] Бадмаева Ю.В. *Охрана земель сельскохозяйственного назначения лесостепной зоны Красноярского края*, дисс.с.х. наук, Барнаул, 2018, 145 с. [Badmaeva Yu. V. *Protection of agricultural lands in the forest-steppe zone of Krasnoyarsk Krai*, diss. of agricultural sciences, Barnaul, 2018, 145 p. (in Russian)]
- [3] Шпедт А.А., Едimeiчев Ю. Ф., Трубников Ю. Н. Агроэкологические аспекты проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия в условиях Средней Сибири. *Достижения науки и техники АПК*, 2018, 32 (5), 5–10. DOI: 10.24411/0235–2451–2018–10501. [Shpedt A. A., Edimeichev Yu.F., Trubnikov Yu.N. Agroecological aspects of the design of adaptive-landscape systems of agriculture under conditions of Central Siberia. *Achievements of science and technology in Agro-Industrial Complex*, 2018, 32 (5), 5–10 (in Russian)]
- [4] Чупрова В.В., Горбунова Ю.В., Демьяненко Т.Н., Евтушенко С.В. Использование катенарных особенностей агроландшафта для разработки адаптивно-ландшафтных систем земледелия в лесостепной зоне Средней Сибири, *Вестник КрасГАУ*, 2019, 3(144), 45–50. EDN KRZEXE. [Chuprova V. V., Gorbunova Yu.V., Dem'yanenko T.N., Evtushenko S. V. Using catenary features of the agrolandscape for the development of adaptive-landscape farming systems in the forest-steppe zone of Central Siberia. *Bulletin of KSAU*, 2019, 3(144), 45–50 (in Russian)]
- [5] Глазунов Г.П., Афонченко Н.В., Двойных В.В. Оценка влияния морфометрических показателей рельефа на плодородие черноземных почв. *Достижения науки и техники АПК*, 2020, 34 (7). doi: 10.24411/0235–2451–2020–10702 [Glazunov G.P., Afonchenko N.V., Dvoinykh V.V. Influence of morphometric terrain indicators on the fertility of chernozem soils. *Achievements of science and technology in Agro-Industrial Complex*, 2020, 34 (7) (in Russian)]
- [6] Yang G., Lu J., Peng Q. Evaluation of FABDEM vertical accuracy and hydrological suitability in complex terrain regions of China: A case study from Guangdong Province. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2026, V. 42, 101969
- [7] Мальцев К.А., Талипова С.Н., Магзянов И. И., Сомов А. А., Мальцева Т. С. Анализ точности эрозионного потенциала рельефа с использованием свободно распространяемых цифровых моделей рельефа. *Цифровая география*. Материалы II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Пермь, 25–28 сентября 2024 г., 35–38. [Maltsev K. A., Talipova S. N., Magzyanov I. I., Somov A. A., Maltseva T. S. Analysis of the Accuracy of the Erosion Potential of the Relief Using Free-Distribution Digital Relief Models. *Digital Geography*. Materials of the II All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation, Perm, September 25–28, 2024, 35–38]. EDN TWTOEN.
- [8] Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J. A 30m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 2022, 2(17), 024016. DOI: 10.1088/1748–9326/ac4d4f EDN: AUPPCP
- [9] Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В., Шевырногов А.П. Разработка и внедрение методов дифференцированного внесения удобрений на полях ОПХ «Курагинское» ФИЦ КНЦ СО РАН по данным дистанционного зондирования. *Вестник КрасГАУ*, 2025, 4(217), 55–64. DOI 10.36718/1819–4036–2025–4–55–64. EDN EPBBXO [Botvich I. Yu. Emelyanov D. V. Shevyrnogov A. P. Development and implementation of methods of differentiated application of fertilizers in the fields of the EPF Kuraginskoye of the Federal research center KSC SB RAS based on remote sensing data. *Bulletin of KSAU*, 2025, 4(217), 55–64 (in Russian)]

[10] Шевырногов А.П., Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В., Вагнер В.В. Развитие методов дифференцированного внесения удобрений по данным высокого пространственного разрешения (PlanetScope, DJI Phantom 4 Multispectral, Micasense Rededge-MX). *Современные проблемы и перспективы развития агрохимии, земледелия и смежных наук о плодородии почв и продуктивности полевых культур в Сибири*: материалы междунар. науч.-произв. конф. с междунар. участием, Красноярск, 20–22 июля 2022 года, 2023, 254–259. DOI 10.52686/9785604525050_398. EDN ZGKILK.

[11] Shahabi E., Jafari M., Taheri Dehkordi A. A New Framework for Vertical Accuracy Assessment and Spatial Error Mapping of Global Digital Elevation Models Using ICESat-2. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 17 December 2025, 10, article number 2, (2026)

[12] Hengl T., Reuter H.I. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Chapter 12, *Geomorphometry in SAGA. Developments in Soil Science*, 2009, 33, 293–308

[13] Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В., Шевырногов А.П. Мониторинг сельскохозяйственных угодий ОПХ ФИЦ КНЦ со ран дистанционными методами. Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы XI Междунар. науч. конф., Красноярск, 10–13 сентября 2024 года. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2024, 257–260 [Botvich I. Yu., Emelyanov D. V., Shevyornogov A. P. Monitoring of Agricultural Land of the Federal Research Center of the Kola Science Center by Remote Methods. Regional Problems of Earth Remote Sensing: Proceedings of the 11th International Scientific Conference, Krasnoyarsk, September 10–13, 2024. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2024, 257–260 (in Russian)]. EDN UBEQEK.

[14] Голубев И.А., Иванова О.И. Специфика развития смыва почв при весеннем снеготаянии на пашне северной зоны Красноярской лесостепи, *Известия Русского географического общества*, 2024, 156 (1), 29–47 [Golubev I. A., Ivanova O. I. The specifics of the development of soil flushing during spring snowmelt in the arable land of the northern zone of the Krasnoyarsk forest-steppe. *Bulletin of the Russian Geographical Society*, 2024, 156 (1, 29–47 (in Russian)]

[15] Голосов В.Н. *Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин*. М.: ГЕОС, 2006. 295 с. [Golosoov, V. N. Erosion-Accumulation Processes in the River Basins of Developed Plains. Moscow: GEOS, 2006. 295 p. (in Russian)]

[16] Бадмаева С.Э., Бадмаева Ю.В., Лидяева Н.Е. Эрозионные процессы на черноземах лесостепной зоны Красноярского края. *Вестник КрасГАУ*, 2019, 4, 62–66 [Badmaeva S. E., Badmaeva Yu. V., Lidyaeva N. E. Erosion processes on chernozyoms of forest-steppe zone of Krasnoyarsk region, *Bulletin of KSAU*, 2019, 4, 62–66 (in Russian)]

[17] Голубев И.А. *Эрозия почв от талых вод на сельскохозяйственных землях Красноярской лесостепи*, автореф. дис. канд. геогр. наук, Москва, 2022, 24 с. [Golubev I. A. *Soil erosion from melt water on agricultural lands of the Krasnoyarsk forest-steppe*, author's abstract. diss. candidate of geographic sciences, Moscow, 24 p. (in Russian)]

[18] Колпакова О.П. Защита сельскохозяйственных земель от эрозионных процессов. *International Agricultural Journal*, 2020, 4, 107–118 [Kolpakova O. P. Protection of agricultural lands from erosion processes. *International Agricultural Journal*, 2020, 4, 107–118 (in Russian)]

[19] Иванова Н.Н., Беляев В.Р. Оценка аккумуляции в буферных зонах агроландшафтов в районах длительного земледельческого использования. *Эволюция эрозионно-руслowych систем, ее хозяйственно-экономические и экологические последствия, прогнозные оценки*

и учет: Всероссийская научно-практическая конференция и XXXII совещание межвузовского координационного совета, 3–6 октября 2017, 145–147 [Ivanova N.N., Belyaev V.R. Assessment of Accumulation in Buffer Zones of Agro-Landscapes in Areas of Long-Term Agricultural Use. Evolution of Erosion-Channel Systems, Its Economic, Social, and Environmental Consequences, Forecasting, and Accounting: All-Russian Scientific and Practical Conference and XXXII Meeting of the Interuniversity Coordinating Council, October 3–6, 2017, 145–147]

[20] Сорокина О.А., Данилов А.Н. Оценка трансформации плодородия почвы залежи на катене в Красноярской лесостепи. *Почвы и окружающая среда*, 2024, 7 (3) [Sorokina O.A., Danilov A.N. Soil fertility transformation of abandoned soils along a catena in the Krasnoyarsk forest-steppe. *The journal of soils and environment*, 2024, 7 (3) (in Russian)]. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v7i3.267>

**Math Modeling.
Numerical Experiment**

**Математическое
моделирование.
Численный
эксперимент**

Theoretical and Applied Heat Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: FUBZBJ

УДК 621.79, 004.942

**Mathematical Model for Estimating
the Melt Pool Depth During 3D Printing
by Selective Laser Melting Technology**

**Maria O. Avdeeva,
Nyura Sh. Glchyan and Aleksandr S. Losev***
*Khabarovsk Branch of the Institute of Applied Mathematics
Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences,
Russian Federation, Khabarovsk*

Received 26.01.2026, received in revised form 01.07.2026, accepted 15.07.2026

Abstract. The article investigates thermal processes in the melt pool zone during selective laser melting of a ceramic material. The aim of the work is to establish an analytical relationship between the temperature at points on the melt pool's axis of symmetry and their distance from the surface exposed to laser radiation under single-pulse heating. The problem is solved through numerical modeling of a non-stationary thermal field, accounting for temperature-dependent thermophysical properties of the material, phase transitions, and convective and radiative heat transfer. The mathematical model was implemented in the COMSOL Multiphysics software package. Calculations were performed for a single laser pulse with a Gaussian distribution of heat flux density at low laser power settings. Temperature values were determined at points on the melt pool's axis of symmetry within the material's phase transition region. Based on statistical processing of the numerical modeling results, an analytical approximating dependence of the depth of a point on the melt pool's axis of symmetry on temperature was obtained. An assessment of the approximation accuracy was conducted, showing that the average error does not exceed 3 %, and the multiple coefficient of determination exceeds 0.99 for the entire considered range of laser pulse energies. The dependence of the approximating function parameters on pulse energy was established, allowing for the derivation of a generalized analytical expression for it. The obtained results can be used for engineering assessment of the material's thermal state and penetration depth during selective laser melting of ceramic materials, as well as for the development and optimization of laser processing regimes.

Keywords: mathematical modeling, selective laser melting, laser pulse, temperature field, melt pool.

Acknowledgements. The work was carried out as part of the state assignment of the IMP FEB RAS No. 075–00460–26–00.

© 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: A.S.Losev@yandex.ru

Citation: Avdeeva M. O., Glchyan N. Sh., Losev A. S. Mathematical Model for Estimating the Melt Pool Depth During 3D Printing by Selective Laser Melting Technology. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(6), 814–822. EDN: FUBZBJ



Математическая модель оценки глубины ванны расплава в процессе 3D-печати по технологии селективного лазерного сплавления

М. О. Авдеева, Н. Ш. Глчян, А. С. Лосев

Хабаровское отделение Института прикладной математики

Дальневосточного отделения

Российской академии наук

Российская Федерация, Хабаровск

Аннотация. В статье исследуются тепловые процессы в зоне ванны расплава при селективном лазерном сплавлении керамического материала. Целью работы является установление аналитической зависимости между температурой в точках оси симметрии ванны расплава и их удалением от поверхности воздействия лазерного излучения при одиночном импульсном нагреве. Задача решается на основе численного моделирования нестационарного теплового поля с учетом температурозависимых теплофизических свойств материала, фазовых переходов, конвективного и радиационного теплообмена. Математическая модель реализована в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Расчёты выполнены для одиночного лазерного импульса с гауссовым распределением плотности теплового потока при небольших мощностях лазерной установки. Температурные значения определялись в точках оси симметрии ванны расплава в области фазового перехода материала. На основе статистической обработки результатов численного моделирования получена аналитическая аппроксимирующая зависимость глубины точки оси симметрии ванны расплава от температуры. Проведена оценка точности аппроксимации, показавшая, что средняя ошибка не превышает 3 %, а множественный коэффициент детерминации превышает 0,99 для всего рассматриваемого диапазона энергий лазерного импульса. Установлена зависимость параметров аппроксимирующей функции от энергии импульса, что позволило получить обобщенное аналитическое выражение для нее. Полученные результаты могут быть использованы для инженерной оценки температурного состояния материала и глубины проплавления при селективном лазерном сплавлении керамических материалов, а также при разработке и оптимизации режимов лазерной обработки.

Ключевые слова: математическое моделирование, селективное лазерное сплавление, лазерный импульс, тепловое поле, ванна расплава.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИМП ДВО РАН № 075–00460–26–00.

Цитирование: Авдеева М. О. Математическая модель оценки глубины ванны расплава в процессе 3D-печати по технологии селективного лазерного сплавления / М. О. Авдеева, Н. Ш. Глчян, А. С. Лосев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(6). С. 814–822. EDN: FUBZBJ

Введение

В настоящее время аддитивные технологии и, в частности, селективное лазерное сплавление (Selective Laser Melting, SLM) широко применяются в различных сферах для получения изделий сложной геометрии из металлических и керамических материалов. Качество конечного продукта (плотность, микроструктура и отсутствие дефектов) напрямую определяется тепловыми процессами, возникающими при локальном высокоинтенсивном лазерном воздействии на материал. В зависимости от особенностей реализуемого процесса происходит образование ванны расплава, ее затвердевание и, как следствие, формирование пористости, трещин и остаточных напряжений [1, 2].

Численное моделирование теплопереноса и фазовых переходов является ключевым инструментом для анализа и оптимизации режимов SLM, особенно в условиях, когда экспериментальные измерения затруднены из-за экстремально высоких температур и малых пространственно-временных масштабов [3, 4]. Значительный объем исследований посвящен математическому моделированию лазерного сплавления с учетом теплопроводности, гидродинамики расплава, испарения и формирования свободной поверхности [5–7]. В частности, для лазерной обработки тугоплавких керамических материалов, таких как оксид алюминия (Al_2O_3), разработаны модели, учитывающие температурозависимые свойства, скрытую теплоту фазовых переходов и граничные условия конвективного и радиационного охлаждения [8, 9].

Несмотря на достигнутый прогресс, большинство существующих моделей ориентированы на получение детальных численных распределений температуры, скорости или геометрии расплава. В то же время для инженерного анализа и быстрого прогнозирования технологических режимов (например, для определения глубины проплавления или оценки температуры в заданной точке) крайне полезны простые, но адекватные аналитические или эмпирические зависимости, связывающие ключевые параметры процесса.

В настоящей работе получена аналитическая зависимость между температурой в точках оси симметрии ванны расплава оксида алюминия и их удалением от поверхности образца при воздействии одиночного лазерного импульса. Задача решается на основе численного моделирования нестационарного теплового поля в программном комплексе COMSOL Multiphysics для диапазона энергий импульса от 0,5 до 2 Дж с последующей статистической обработкой результатов и оценкой значимости полученной зависимости.

Постановка задачи

В основу моделирования теплового поля $T(x, y, t)$ положено нестационарное уравнение теплопроводности с объемным источником тепла от лазера:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

где ρ – плотность алюмооксида (кг/м^3), C_p – его удельная теплоемкость ($\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$), k – теплопроводность ($\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$). Удельная теплоемкость при постоянном давлении:

$$C_p = C_{p,0} + \delta_m L_m + \left(\frac{L_m}{T_m} \right) H'((T - T_m), \Delta T) + \delta_v L_v + \left(\frac{L_v}{T_v} \right) H'((T - T_v), \Delta T) \quad (2)$$

зависит от теплоемкости $C_{p,0} = 880$, функций нормализации температуры плавления δ_m и нормализации температуры испарения δ_v :

$$\delta_m = \frac{\exp \left[-\frac{(T - T_m)^2}{\Delta T^2} \right]}{\Delta T \sqrt{\pi}}, \quad \delta_v = \frac{\exp \left[-\frac{(T - T_v)^2}{\Delta T^2} \right]}{\Delta T \sqrt{\pi}}, \quad (3)$$

скрытой теплоты плавления $L_m = 1067,43$ Дж/г, скрытой теплоты испарения $L_v = 1066,5$ Дж/г, температуры плавления $T_m = 2324$ К, температуры испарения $T_v = 3273,15$ К, полуширины кривой $\Delta T = 30$ К и функции Хевисайда H' [9–10]. Температурозависимые коэффициенты ρ , C_p , k определяются кусочно-аналитическими функциями [9].

На рис. 1 представлена геометрия модели. Стрелками сверху (граница 1, рис. 1) обозначена область воздействия лазера, плотность теплового потока которого характеризуется гауссовым распределением (Вт/м²):

$$P_g = B \left(\frac{E_p}{P_w \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right)} \right) \exp \left(-\frac{(x - x_r)^2}{2\Phi^2} \right). \quad (4)$$

Здесь $\Phi = 100$ мкм – стандартное отклонение гауссова лазерного луча, $x_r = 1000$ мкм – опорная точка, соответствующая центру лазерного луча, $D = 0,6$ мм – диаметр луча, $B = 0,25$ – поглощательная способность, $P_w = 0,5$ мс – длительность импульса, E_p – энергия импульса. Также на границе 1 наблюдаются естественное конвекционное охлаждение и излучение (пульсирующий лазерный источник тепла), которые задаются равенством:

$$-k \frac{dT}{dy} = \beta P_g - h(T - T_a) - \sigma \varepsilon (T^4 - T_a^4), \quad (5)$$

где β – прямоугольная функция параметра включения и выключения лазера, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана, $\varepsilon = 0,7$ – излучательная способность, $T_a = 293,15$ К – температура окружающей среды, $h = 10$ Вт/(м²·К) – коэффициент теплоотдачи.

На границах 2 и 3 накладываются условия конвективного теплообмена, на границах 4 и 5 – радиационные потери, на границе 6 – краевое условие:

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_a) - \sigma \varepsilon (T^4 - T_a^4), \quad (6)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = h(T - T_a) - \sigma \varepsilon (T^4 - T_a^4), \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0. \quad (8)$$

В начальный момент времени во всей расчетной области температура равна температуре окружающей среды $T(x, y, 0) = T_0 = 293,15$ К.

В работе [11] исследована реакция керамического материала на воздействие одиночного лазерного импульса в 1 Дж с гауссовым профилем плотности мощности. В результате моделирования были получены температурные распределения в точках 1–8 расчетной области (рис. 2) и установлена локализация зоны расплава относительно аппроксимирующих парабол. В [11] отмечено, что температура в ванне расплава по мере удаления от границы 1 (рис. 2) уменьшается нелинейно. Это представляет отдельный интерес с технологической точки зрения и, следовательно, задача установления аналитической зависимости между температурой в отдельно взя-

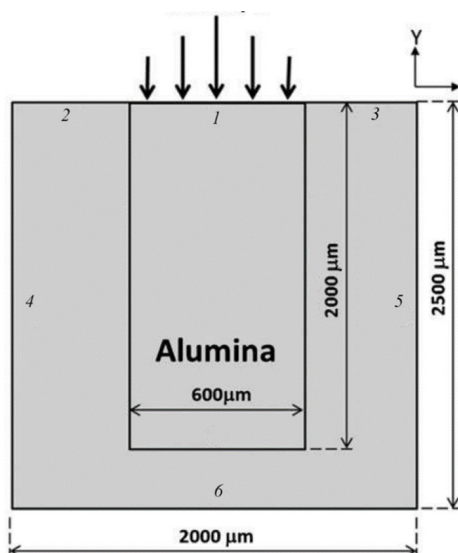


Рис. 1. Двумерная геометрия модели ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ м}$)

Fig. 1. Two-dimensional geometry of the model ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ м}$)

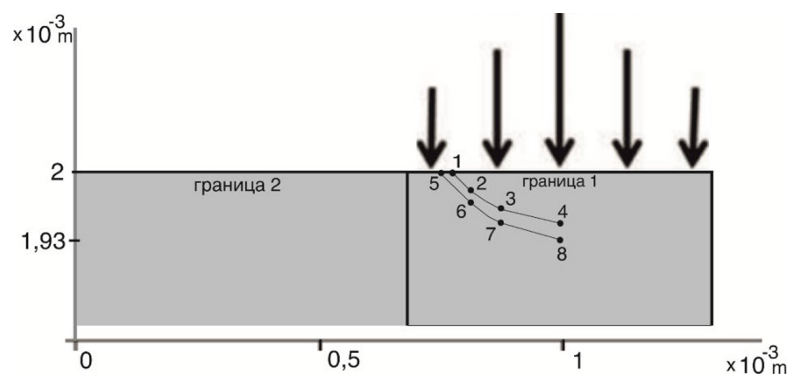


Рис. 2. Точки, исследованные в [11]

Fig. 2. Points investigated in [11]

той точке ванны расплава и ее удаленностью от поверхности воздействия требует отдельного рассмотрения.

Методология исследования

В качестве исходных данных для математического моделирования использованы параметры лазера JK 701 Lumonics и керамического образца из оксида алюминия (Al_2O_3) [9]. Проведена серия замеров температуры ниже центра области воздействия лазерного импульса (рис. 1, 2) при различных значениях энергии импульса лазерной установки, с целью установления в точках оси симметрии ванны расплава аналитической зависимости между температурой и расстоянием до границы 1. Используя полученные данные, определены уровень статистической значимости $F_{эм}$ и доля дисперсии результативного признака R^2 .

Численное решение поставленной задачи проведено в программном комплексе COMSOL Multiphysics [12], широко используемом при моделировании сложных термодинамических процессов, характерных для селективного лазерного плавления и обладающих необходимыми вычислительными возможностями.

Анализ и обсуждение результатов

На основе имитационного моделирования в COMSOL Multiphysics для энергии импульса лазерной установки E_p в диапазоне от 0,5 до 2 Дж была определена температура в точках оси симметрии ванны расплава, начиная с глубины $l_0 = 10^{-5}$ м с равным шагом до дна ванны, т.е. до тех пор, пока в измеряемых точках $T > 2324$ К в начальные моменты времени (рис. 3).

В ходе регрессионного анализа для полученных данных установлена функциональная зависимость вида:

$$l(T) = 10^{aT+b}, \quad (9)$$

где l – расстояние от точки до поверхности ванны расплава (10^{-6} м), T – температура материала. В табл. 1 в зависимости от энергии импульса определены параметры a , b и для каждого случая рассчитаны оценка уровня средней ошибки аппроксимации $A(\%)$ и множественный коэффициент детерминации R^2 :

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{l(T_i) - l_i}{l_i} \right| \cdot 100 \%, \quad (10)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (l(T_i) - l_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{l}_i - l_i)^2}. \quad (11)$$

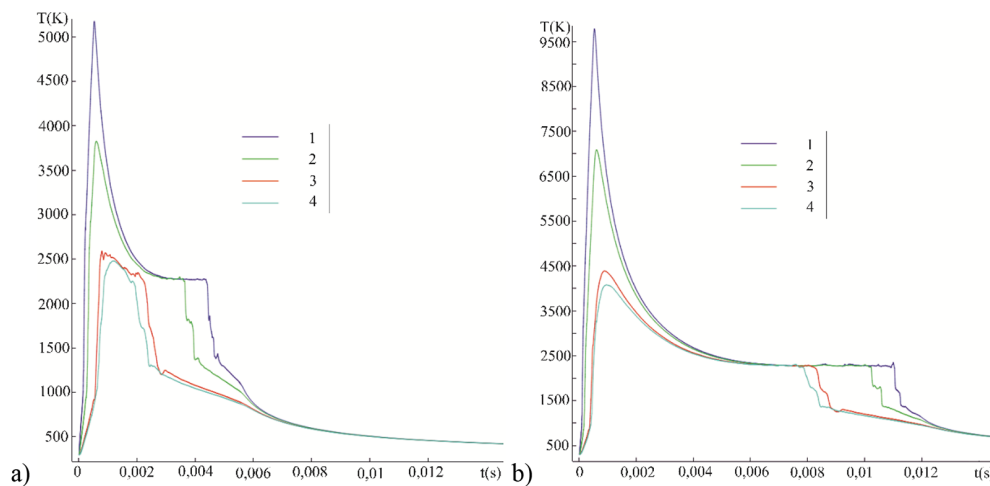


Рис. 3. Распределение температур в точках оси симметрии ванны расплава на глубине (1) – $2 \cdot 10^{-5}$ м, (2) – $3,8 \cdot 10^{-5}$ м, (3) – $5,4 \cdot 10^{-5}$ м, (4) – $5,8 \cdot 10^{-5}$ м при энергии импульса лазерной установки: а) 1 Дж б) 2 Дж

Fig. 3. Temperature distribution at points of the axis of symmetry of the melt bath at a depth of (1) – $2 \cdot 10^{-5}$ m, (2) – $3,8 \cdot 10^{-5}$ m, (3) – $5,4 \cdot 10^{-5}$ m, (4) – $5,8 \cdot 10^{-5}$ m at a laser system pulse energy of: а) 1 J б) 2 J

Таблица 1. Значения параметров соотношения (9) для различных энергий импульса. Оценка средней ошибки аппроксимации и множественного коэффициента детерминации

Table 1. Values of the parameters of relation (9) for different pulse energies. Estimate of the average approximation error and the multiple determination coefficient

E_p (Дж)	$a \cdot 10^{-8}$	$b \cdot 10^{-8}$	A (%)	R^2
0,6	-35298	-365978199	2,66	>0,99
0,7	-23277	-381453239	0,07	
0,9	-18079	-385520937	0,08	
1,0	-17290	-381940451	0,17	
1,2	-13909	-387126327	0,13	
1,4	-12225	-385993575	0,21	
1,6	-10579	-387112849	0,24	
2,0	-9077	-383346850	0,39	

Здесь l_i – эмпирический показатель глубины для текущей точки ванны расплава, n – число замеров. Полученные результаты показали допустимую ошибку аппроксимации менее 10 % и высокую долю дисперсии результативного признака (более 99 %).

Также заметим, что параметр a зависит от E_p следующим образом:

$$a(E_p) = 17 \cdot 10^{-5} \cdot E_p^{-1}. \quad (12)$$

Полученное выражение $a(E_p)$ имеет низкую ошибку аппроксимации менее 3 % и высокий процент дисперсии результативного признака (более 99 %). Таким образом, из соотношений (9), (12) и результатов табл. 1 следует, что аппроксимирующая функция зависимости от температуры в отдельно взятой точке оси симметрии ванны расплава ее удаленности от поверхности воздействия лазера имеет вид:

$$\lg l = -17 \cdot 10^{-5} \cdot E_p^{-1} \cdot T - 3,8. \quad (13)$$

Соотношение (13) верно и статистически значимо для значений E_p в диапазоне от 0,5 до 2 Дж и $T > 2324$ К, что подтверждается критерием Фишера (табл. 2) – все эмпирические значения $F_{эм}$ превышают табличное $F_{таб}$ при уровне значимости 0,01. Также в ходе исследования отмечено снижение средней ошибки аппроксимации при наименьших значениях энергии импульса лазерной установки E_p от 0,5 до 0,6 Дж. Для остальных E_p замечено незначительное повышение, не превышающее 1,5 %. Высокое значение множественного коэффициента детерминации составляет более 99 %.

Необходимо отметить, что ограничения на указанный диапазон импульса лазерной установки продиктованы ее техническими возможностями (от 0,5 Дж) и физико-химическими характеристиками образца (до 2 Дж). Очевидно, что чем выше энергия лазерного импульса, тем глубже ванна расплава и выше начальная температура на поверхности материала. При этом необходимо учитывать, что для энергии импульса свыше 2 Дж в образованной ванне расплава с глубиной порядка 10^{-4} м более 60 % образца находятся в состоянии кипения. Это требует введения в используемую математическую модель дополнительных условий или построении новой.

Таблица 2. Значения параметров соотношения (13) и оценка его статистической значимости в зависимости от энергии импульса

Table 2. Values of the parameters of relation (13) and assessment of its statistical significance depending on the pulse energy

E_p (Дж)	$a(E_p) \cdot 10^{-8}$	A (%)	$F_{эм}$	$F_{таб}$
0,6	-28333	0,93	25,89	4,74
0,7	-24286	0,45	100,83	
0,9	-18889	0,31	225,37	
1,0	-17000	0,58	81,61	
1,2	-14167	1,13	58,43	
1,4	-12143	1,29	26,08	
1,6	-10625	1,39	36,34	
2,0	-8500	1,47	51,91	

Заклучение

Разработанная модель позволяет проследить для лазерной установки с малыми энергиями импульса из диапазона от 0,5 до 2 Дж динамику теплового воздействия на керамический образец из оксида алюминия в зоне ванны расплава. Полученная аппроксимация отражает аналитическую зависимость между температурой и глубиной расположения точки в центре ванны расплава, позволяет расширить представления об особенностях физико-химических процессов, проходящих внутри ванны расплава и уточнить информацию о фазовых переходах. Предложенная техника в дальнейшем может быть использована для получения аналогичных результатов при исследовании теплового воздействия лазерного импульса на других образцах, и в зависимости от их температуры плавления предполагает возможность увеличения энергии импульса.

Список литературы / References

- [1] Рудской В.К. [и др.] Аддитивные технологии. *Материалы и технологические процессы*. СПб.: Политех-Пресс, 2021. 515 с. [Rudskoi V.K. [et al.] Additivnye tekhnologii. Materialy i tekhnologicheskie protsessy. Saint Petersburg, Politekh-Press, 2021. 515 p. (in Russian)]
- [2] Mukherjee T., DebRoy T. *Theory and Practice of Additive Manufacturing*. Wiley, 2023.
- [3] Liu T.S., Chen P., et al. Review on laser directed energy deposited aluminum alloys. *Int. J. Extrem. Manuf.*, 2024, 6(2), 022004.
- [4] Bayat M., Dong W., Thorborg J., To A.C., Hattel J.H. A review of multi-scale and multi-physics simulations of metal additive manufacturing processes with focus on modelling strategies. *Additive Manufacturing*, 2021, 47, 102278.
- [5] Yu T., Zhao J. Quantitative simulation of selective laser melting of metals enabled by new high-fidelity multiphase, multiphysics computational tool. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 2022, 399, 115422.
- [6] Russell M.A., Souto-Iglesias A., Zohdi T.I. Numerical simulation of Laser Fusion Additive Manufacturing processes using the SPH method. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 2018, 341, 163–187.

- [7] Yua J., Lin X., Wang J. Mechanics and energy analysis on molten pool spreading during laser solid forming. *Applied Surface Science*, 2010, 256, 4612–4620.
- [8] Samant A. N., Dahotre N. B. Laser machining of structural ceramics – a review. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2009, 29(6), 969–993.
- [9] Vora H. D., Santhanakrishnan S., Harimkar S. P., Boetcher S. K. S., Dahotre N. B. One-dimensional multipulse laser machining of structural alumina: Evolution of surface topography. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2013, 68, 69–83.
- [10] Гордеев Г. А. Моделирование теплофизических процессов в порошках металлов при селективном лазерном плавлении. Дисс... канд. физ.-мат. наук, Ижевск, 2020, 189 [Gordeev G. A.. *Modeling of Thermophysical Processes in Metal Powders during Selective Laser Melting*. Dissertation for the Degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Izhevsk, 2020, 189 (in Russian)]
- [11] Глчян Н. Ш. Локализация ванны расплава моделированием теплопередачи в процессе 3D-печати по технологии селективного лазерного сплавления. *Материалы VI национальной научной конференции Far East Math 2025, Хабаровск, 4–6 декабря 2025 г. Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет (ТОГУ), 2025.* [Gichyan N. Sh. Localization of the melt pool by heat transfer modeling in the 3D printing process using selective laser melting technology. *Materials of the VI National Scientific Conference Far East Math 2025, Khabarovsk, December 4–6, 2025. Khabarovsk: Pacific National University (TOGU), 2025 (in Russian)]*
- [12] COMSOL Documentation [Electronic resource]. Access: <http://localhost:8090/docserver/#!/com.comsol.help.comsol/helpdesk/helpdesk.html>

Theoretical and Applied Heat Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: EUJMBS

УДК 628.356:51–74

**An Energy-Saving Control System
in Wastewater Aeration Processes**

**Makhsud I. Makhmudov^a,
Siroj S. Nurov^{a*} and Uktam F. Mamirov^b**

*^aBukhara State Technical University
Bukhara, Uzbekistan*

*^bTashkent State Technical University
Tashkent, Uzbekistan*

Received 29.01.2026, received in revised form 01.07.2026, accepted 15.07.2026

Abstract. This paper studies the factors affecting the efficiency of the wastewater aeration process, in particular the concentration of dissolved oxygen, which largely determines the quality of the aeration process. The paper also proposes a control system for the aeration process based on fuzzy logic control, which has recently been gaining an increasingly wide scale of application in process control systems and production. A mathematical model of fuzzy logic for controlling the aeration process based on the Mamdani method and a rule base for controlling the parameters of input and output signals at the current time are developed.

Keywords: aeration, dissolved oxygen concentration, wastewater, fuzzy logic, fuzzification.

Citation: Makhmudov M. I., Nurov S. S., Mamirov U. F. An Energy-Saving Control System in Wastewater Aeration Processes. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(6), 823–834. EDN: EUJMBS



Энергосберегающая система управления процессами аэрации сточных вод

М. И. Махмудов^а, С. С. Нуров^а, У. Ф. Мамиров^б

^аБухарский государственный технический университет

Узбекистан, Бухара

^бТашкентский государственный технический университет

Узбекистан, Ташкент

Аннотация. Исследованы факторы, влияющие на эффективность аэрации сточных вод, в частности концентрацию растворенного кислорода, которая в значительной степени определяет качество результата. Предложена система управления процессом аэрации на основе нечеткой логики, которая в последнее время получает все более широкое применение в системах управления технологическими процессами и производстве. Разработана математическая модель нечеткой логики для управления процессом аэрации на основе метода Мамдани и базы правил для управления параметрами входных и выходных сигналов в момент времени.

Ключевые слова: аэрация, концентрация растворенного кислорода, сточные воды, нечеткая логика, фазификация.

Цитирование: Махмудов М. И. Энергосберегающая система управления процессами аэрации сточных вод / М. И. Махмудов, С. С. Нуров, У. Ф. Мамиров // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(6). С. 823–834. EDN: EUJMBS

Introduction

The concentration of dissolved oxygen (DO) is one of the most important parameters to be monitored due to its influence on biological processes and the energy consumption associated with aeration. During aerobic biological treatment, the dissolved oxygen concentration must be sufficiently high to provide microorganisms in activated sludge with an adequate supply of oxygen for the effective decomposition of organic matter [1]. On the other hand, excessively high DO concentrations, which require high air supply rates, lead to increased energy consumption and may deteriorate the quality of the activated sludge.

The most significant advantage of intelligent control lies in the fact that it does not require an accurate mathematical model; it can effectively approximate any nonlinear continuous function and overcome the shortcomings of traditional control approaches that rely heavily on precise mathematical modeling. In this invention, an integrated neuro-fuzzy process controller is developed for predicting and controlling aeration performance in aerobic wastewater treatment. By employing such a hybrid fuzzy control algorithm, the proposed controller can determine the optimal air supply rate during operation, ultimately resulting in energy savings.

The COD concentration in the aeration tank is determined by the balance between oxygen supply through aeration and its consumption by microorganisms and chemical reactions. The main factors affecting COD can be classified as follows:

The air flow rate (volume of air supplied per unit of time, m³/h) and the type of aerators determine the efficiency of oxygen mass transfer. Higher intensity increases the CRC but also increases energy consumption. The efficiency of oxygen mass transfer depends on the size of the bubbles—fine bubble aerators are more efficient, and the depth of immersion of the aerators [2]. Fine bubble aerators provide

an oxygen mass transfer coefficient K_L in the range of 3–10 h⁻¹, while large bubble aerators provide 1–4 h⁻¹. The standard oxygen transfer efficiency for fine bubble systems is 4–8 % per meter of immersion depth. With an air supply of 0.5–2 m³/m³·h, DO can be maintained at 1.5–3 mg/l under typical organic loading conditions. Studies show that a 10 % increase in aeration intensity increases DO by 0.5–1 mg/l, but increases energy consumption by 8–15 %. Energy costs for aeration account for 50–70 % of the total energy consumption of treatment plants.

Another factor affecting biological wastewater treatment is the temperature of the raw wastewater and the outside air temperature. The average temperature of wastewater in Russian cities during the cold season ranges from 15 to 17 °C, while the temperature of water in small and medium-sized settlements is 9–14 °C. In aeration tanks with a normal aeration regime at an air temperature of 10 to 20 °C, the temperature of the effluent drops by 1–3 °C during treatment, and in aeration tanks with extended aeration mode and shield covers, it drops by 4–9 °C, which leads to a slowdown or complete cessation of the biochemical treatment of wastewater. In countries with hot climates, high wastewater and air temperatures and direct sunlight contribute to an increase in the temperature of the treated effluent to 35 °C and above, which also has a negative effect on the solubility of oxygen in the air and the speed of the effluent treatment process [3]. The construction of closed sewage treatment plants partially solves the problems of cooling or heating the treated liquid. However, the main direction for optimizing the temperature regime of the facilities is to increase the oxygen utilization coefficient.

Increases oxygen consumption by microorganisms for metabolism and organic matter decomposition, reducing COD [4]. Low can lead to insufficient biomass, which also affects the COD balance. Typical range: 2–5 g/l for standard aerotanks, 8–12 g/l for membrane bioreactors. Increasing K_s from 3 to 5 g/l increases the oxygen consumption rate by 30–50 %, reducing DO by 0.5–1.5 mg/l with unchanged aeration. OUR for activated sludge: 10–30 mg O₂/g K_s · h at BOD 100–300 mg/l. High K_s > 6 g/l can reduce DO to K_s < 1 mg/l, which inhibits nitrification by 50–70 %. Optimal K_s 3–4 g/l provides a balance between DO and treatment efficiency. For example: at K_s 4 g/l and BOD 200 mg/l, OUR is about 80 mg/l·h, which requires an air supply of 1.5 m³/h to maintain DO 2 mg/l.

BOD reflects the amount of oxygen required for the aerobic decomposition of biodegradable organic substances by microorganisms. High BOD in incoming wastewater increases the oxygen demand in the aeration tank [5]. If the aeration system does not provide sufficient dissolved oxygen, usually 1–2 mg/L is required, the decomposition process slows down, reducing treatment efficiency. A lack of oxygen can lead to a transition from aerobic to anaerobic conditions, causing the accumulation of incomplete decomposition products, deterioration of treatment quality, and the appearance of unpleasant odors. COD indicates the total content of organic substances that can be oxidized chemically. A high COD indicates a significant organic load, but some of the substances included in COD may be difficult to decompose or toxic to microorganisms in the aeration tank. This increases the load on the aeration system, as more oxygen is required to oxidize the available organic compounds. If the BOD/COD ratio is low < 0.3, this indicates a predominance of non-biodegradable substances, which reduces the efficiency of biological treatment and requires additional treatment methods. High organic loading of BOD and COD increases the oxygen demand in the aeration tank, making it difficult to maintain the optimal oxygen regime of the CRT. This requires increased aeration, increases energy consumption, and can reduce treatment efficiency when overloaded. For stable operation of the aeration tank, it is necessary to control the organic load, regulate the oxygen supply, and, if necessary, use preliminary wastewater treatment.

pH is a measure of the acidity or alkalinity of a solution, which indicates the concentration of hydrogen ions H^+ in the environment. pH affects the activity of microorganisms and chemical reactions by changing oxygen consumption. pH regulates the activity of microorganisms and the rate of chemical reactions, directly affecting oxygen consumption [6]. The optimal pH provides maximum biological and chemical activity, while extreme values (too low or too high pH) suppress these processes or shift them towards specific reactions. Optimal pH: Most microorganisms have a pH range at which their enzymes work most efficiently, usually, pH 6–8 for neutrophils. Deviation from this range reduces enzyme activity, slowing down metabolism and oxygen consumption. pH also changes the rate of oxidation of substances and the solubility of gases. For example, in an acidic environment, some reactions accelerate, increasing oxygen consumption, while in an alkaline environment, they slow down. Aerobic microorganisms use oxygen to decompose organic matter. If the pH is not optimal, their activity decreases and oxygen consumption decreases. Chemical processes that depend on pH also affect the rate of O_2 utilization.

Methodology

Mathematical models based on mass transfer equations and the kinetics of biological processes are used to describe the dynamics of CRF in aerotanks [7]. The main approaches include oxygen mass transfer equation. The concentration of oxygen is described by a differential equation that takes into account the supply and consumption of oxygen, the so-called equation:

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_s - C_{do}) - v_{cr}, \quad (1)$$

where: C_{do} – concentration of dissolved oxygen (mg/L), K_L – oxygen mass transfer coefficient (h^{-1}), C_s – oxygen saturation concentration (mg/L), v_{cr} – oxygen consumption rate (mg/l·h).

The coefficient K_L depends on: Aeration intensity, temperature ($(K_L a \propto T^{0.024})$), salt content and surfactants.

v_{cr} – oxygen consumption rate depends on the concentration of activated sludge and organic load:

$$v_{cr} = q_{O_2} \cdot X \cdot S, \quad (2)$$

where q_{O_2} – specific oxygen consumption rate (mg O_2 /g sludge·h), X – activated sludge concentration (g/L), S – substrate concentration (mg/L).

In turn, the oxygen consumption rate v_{nk} depends on pH, which can be expressed as a function of microbial activity. Empirically, this can be described, for example, by a Gaussian dependence:

$$v_{cr} = v_{crmax} * e^{-\frac{(pH-pH_{opt})^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

where v_{crmax} – maximum oxygen consumption rate at optimal pH ($pH_{opt} \approx 7-7.5$); σ is a parameter characterizing the sensitivity of microorganisms to pH changes.

For a specific aerotank, the dependence of RC on pH is usually determined experimentally or through modeling. In general:

- At 6 < pH > 9, the COD concentration may increase due to a decrease in biological activity.
- At pH 6.5–8.5, RC stabilizes at a level determined by the intensity of aeration and organic load.

Aeration is a nonlinear process that depends on many variables (dissolved oxygen concentration, temperature, pollution level, biological activity of microorganisms). PID controllers designed for linear systems do not cope well with nonlinear dynamics. When conditions change (e.g., a jump in the concentration of organic matter in wastewater), a PID controller may produce inadequate control actions, leading to air overspending or insufficient aeration. For example: In aerotank, changes in the inflow of wastewater cause fluctuations in the oxygen level, which makes it difficult to accurately adjust the PID controller. In aeration systems, there is a time delay between the supply of air and the change in the concentration of dissolved oxygen (due to diffusion and the reaction of microorganisms). PID controllers do not work well with systems that have significant transport delays [8]. The controller may lag in its response, causing fluctuations (oscillations) or instability in the process. For example: In a bioreactor, the air supply may not immediately affect the O_2 level, resulting in suboptimal control.

PID controllers require precise tuning of coefficients (K_p , K_i , K_d), which can be difficult for systems with variable parameters. Optimal settings for some conditions may become ineffective when the load or composition of the environment changes. Incorrect settings lead to over-regulation (too much air supply) or under-regulation (lack of oxygen), which reduces process efficiency and increases energy consumption. PID controllers typically work with a single control variable (e.g., O_2 concentration). In aeration, however, many factors must be considered simultaneously: temperature, pH, contaminant concentration, air flow. Ignoring additional variables leads to suboptimal control, reducing treatment quality or increasing costs. PID controllers often operate in a constant correction mode, which can lead to excessive air supply, especially when conditions change abruptly. This results in excessive energy consumption by blowers, which accounts for a significant portion of operating costs in aeration systems (up to 50–70 % in wastewater treatment).

In addition, PID controllers do not have built-in adaptability to changes in the process. Complex systems such as aeration require dynamic parameter adjustment, which is impossible without additional algorithms. The system becomes less effective with seasonal changes, changes in wastewater composition, or other external factors. For example: In winter, lower water temperatures slow down biological processes, but the PID controller continues to operate according to the old settings, which reduces the quality of treatment.

Fuzzy logic allows modeling complex systems with uncertainty using linguistic rules [9]. Recently, fuzzification, as an element of fuzzy logic, has been actively used to control complex processes, including aeration, where accurate mathematical models are difficult due to uncertainty and variability of parameters.

Fuzzification is the process of converting clear numerical input data into fuzzy sets with membership functions, which allows the system to take uncertainty into account [10]. Aeration is the process of saturating a liquid with oxygen, used in wastewater treatment, fermentation, or water treatment. The application of fuzzy logic in aeration control allows the process to be optimized, taking into account fuzzy data such as variable oxygen concentrations, temperature, or raw material composition (Fig.1).

The Mamdani fuzzy model can be used to control the aeration process in an aeration tank, which provides biological wastewater treatment by supplying air to maintain the activity of microorganisms [11]. The model accepts input parameters describing the state of the system and outputs control parameters to optimize the concentration of dissolved oxygen C_{do} and the power consumption of the

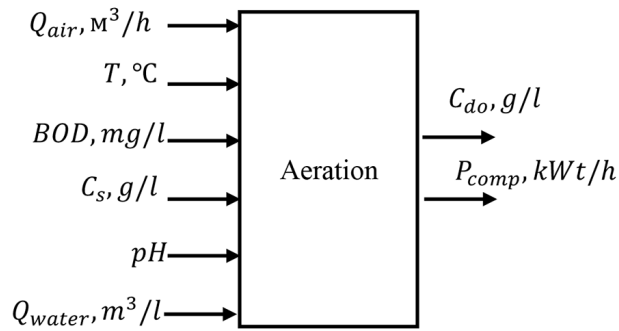


Fig.1. Model of input and output parameters of the wastewater aeration process where: Q_{air} – air flow rate, m^3/h ; T – wastewater temperature, $^{\circ}C$; BOD – biochemical oxygen demand of incoming wastewater, mg/l ; C_s – concentration of activated sludge in the aeration tank, g/l ; pH – water acidity, Q_{water} – volume of wastewater in the aeration tank, m^3/l ; C_{do} – concentration of dissolved oxygen, g/l ; P_{comp} – power consumed by the compressor, kWt/h

compressor P_{comp} . To develop a fuzzy control system for the aeration process, we first define the input (Table 1) and output parameters (Table 2).

After determining the input and output variables of the control system, we compile a sequence of fuzzy logic for controlling the aeration process using the Mamdani method (Fig. 2). Each input and output variable is represented as fuzzy sets with corresponding membership functions $\mu(x)$, which determine the degree of membership of a value x to a specific linguistic term (e.g., “low,” “medium,” “high”). Membership functions are selected as triangular $\mu_{mpe}(x)$ or trapezoidal $\mu_{mp}(x)$ for boundary terms.

For each parameter, we define five terms to increase accuracy. The rules for selecting terms for the fuzzy model of the aeration process in an aerotank using the Mamdani method are based on the principles of fuzzy logic, the technological features of the aeration process, and expert knowledge.

Table 1. Input parameters

Parameters	Unit of measurement	Range of possible values
Q_{air} – Air flow rate	m^3/h	100,1200
T – Wastewater temperature	$^{\circ}C$	5.35
BOD – biochemical oxygen demand	mg/l	50,600
C_s – concentration of activated sludge	g/l	1.7
pH – water acidity	-	5.5–9.5
Q_{water} – wastewater volume	m^3/h	500,600

Table 2. Output parameters

Parameters	Unit	Range of possible values
C_{do} – dissolved oxygen concentration	g/l	0–2.5
P_{comp} – compressor power consumption	kW/h	5–120

Terms are linguistic descriptions of the states of input and output parameters that are used to represent values in fuzzy sets. The rules and criteria for selecting terms, adapted to your request, are described below, without unnecessary details and with mathematical rigor.

✓ Terms should reflect the actual states of parameters characteristic of the aeration process.

✓ The selection of terms takes into account physical limitations such as oxygen solubility or biochemical oxygen demand;

✓ More terms are used for each parameter to ensure sufficient detail and flexibility of the model. This allows you to describe transitional states and avoid overly coarse divisions. Terms are selected to ensure coverage of all possible combinations of input parameters in the rule base.

✓ The range of each parameter is divided into overlapping intervals to account for fuzziness and smooth transitions. The overlap of membership functions is about 20–30 % between neighboring terms (Table 3).

Table 3. Term definition for parameters

Parameters	Terms	Term range
Q_{air} , (m ³ /h)	Very low	[100, 100, 200, 300]
	Low	[200, 400, 600]
	Medium	[400, 700, 900]
	High	[700, 1000, 1100]
	Very high	[1000, 1100, 1200, 1200]
T, (°C)	Very low	[5, 5, 8, 12]
	Low	[8, 15, 20]
	Medium	[15, 22, 28]
	High	[25, 30, 33]
	Very high	[30, 33, 35, 35]
BOD, (mg/L)	Very low	[50, 50, 100, 150]
	Low	[100, 200, 300]
	Medium	[200, 350, 450]
	High	[400, 500, 550]
	Very high	[500, 550, 600, 600]
C_s , (g/l)	Very low	[1, 1, 1.5, 2]
	Low	[1.5, 2.5, 3.5]
	Medium	[2.5, 4, 5.5]
	High	[4.5, 5.5, 6.5]
	Very high	[5.5, 6, 7, 7]
pH	Very low	[5.5, 5.5, 6, 6.5]
	Low	[6, 6.8, 7.2]
	Medium	[6.8, 7.5, 8.2]
	High	[7.8, 8.5, 9]
	Very high	[8.5, 9, 9.5, 9.5]

Table 3. Continued

Parameters	Terms	Term range
Q_{water} (m ³ /h)	Very low	[500, 500, 1000, 1500]
	Low	[1000, 2000, 3000]
	Medium	[2000, 3500, 4500]
	High	[4000, 5000, 5500]
	Very high	[5000, 5500, 6000, 6000]
C_{do} (g/l)	Very low	[0.2, 0.2, 0.5, 1]
	Low	[0.5, 1.5, 2.5]
	Medium	[1.5, 2.5, 3.5]
	High	[2.5, 3.5, 4.5]
	Very high	[3.5, 4.5, 5, 5]
P_{comp} (kW/h)	Very low	[5, 5, 15, 30]
	Low	[15, 30, 50]
	Medium	[30, 60, 90]
	High	[60, 90, 110]
	Very high	[90, 110, 120, 120]

Results

The proposed fuzzy logic–based aeration control system was evaluated using a simulation model of an aeration tank under variable operating conditions. The assessment focused on the behavior of dissolved oxygen concentration, compressor power consumption, and system response to changes in key input parameters, including air flow rate, wastewater temperature, biochemical oxygen demand, activated sludge concentration, pH, and wastewater inflow rate. Simulation results showed that the fuzzy controller maintains the dissolved oxygen concentration within the optimal range of 1.5–2.5 mg/l under varying organic and hydraulic loads. When influent BOD increased from 150 to 450 mg/l, the controller adaptively increased the air flow rate, preventing a critical drop in DO concentration below 1.2 mg/l, which is typically observed in systems using fixed or poorly tuned PID control (Fig. 2).

At low organic loads $\text{BOD} < 150 \text{ mg/L}$, the fuzzy controller reduced aeration intensity, stabilizing DO levels without excessive oxygen oversupply. This behavior demonstrates the ability of the fuzzy logic system to balance oxygen availability and biological demand while avoiding unnecessary aeration.

The fuzzy control system exhibited robust performance under temperature variations from 8 to 32 °C. At lower temperatures, which slow down microbial activity and reduce oxygen consumption, the controller decreased compressor power while maintaining stable DO concentration. Conversely, at elevated temperatures, where oxygen solubility decreases, the system compensated by moderately increasing air supply (Fig. 3).

pH variations in the range of 6.0–8.5 had a noticeable impact on oxygen consumption rates. The fuzzy controller successfully adjusted aeration intensity to account for reduced microbial activity at suboptimal pH values, preventing excessive oxygen accumulation or deficit. This confirms the effectiveness of the fuzzy rule base in handling nonlinear biochemical effects (Fig. 4).

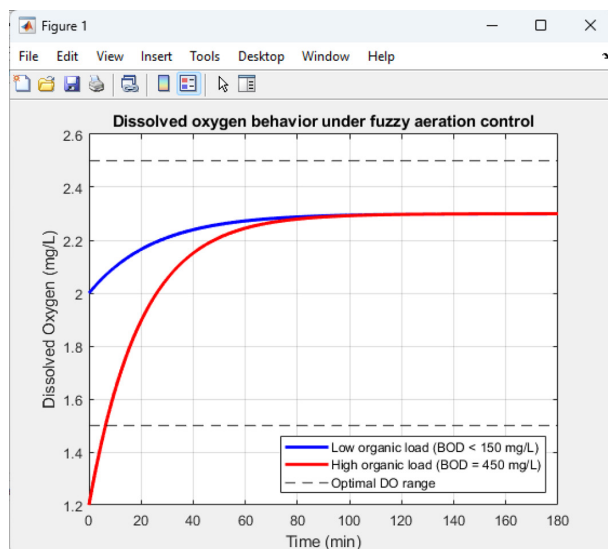


Fig. 2. Dissolved oxygen behavior under fuzzy aeration control

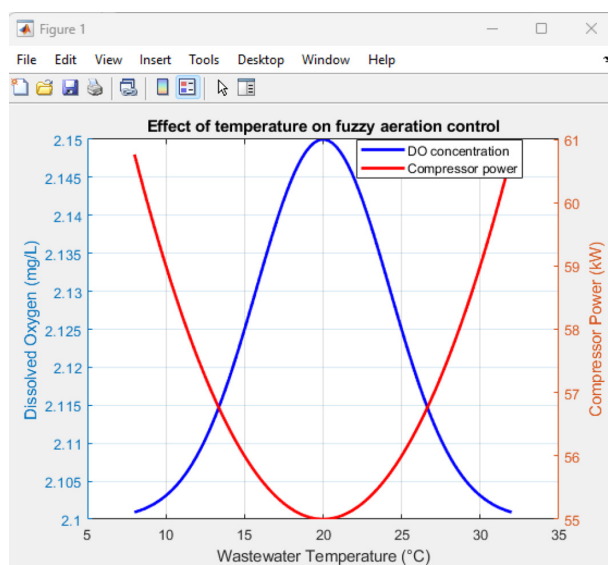


Fig. 3. Effect of temperature on fuzzy aeration control

One of the most significant results of the study is the reduction in compressor energy consumption. Compared to a conventional PID-based control strategy, the fuzzy logic controller reduced average power consumption by 12–25 %, depending on operating conditions. At stable inflow conditions, the compressor operated at 30–40 % lower power than nominal capacity, while during peak loads, power consumption increased smoothly without sharp fluctuations. This behavior reduces mechanical stress on blowers and extends equipment lifetime (Fig. 5).

The fuzzy controller demonstrated improved dynamic performance compared to classical control methods. Following step changes in influent flow rate or BOD concentration, the system reached a new steady state within 15–25 minutes, with minimal overshoot in DO concentration. Oscillations

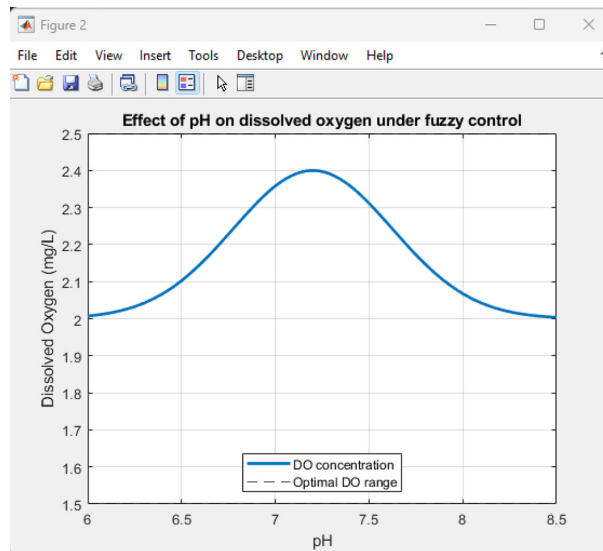


Fig. 4. Effect of pH on dissolved oxygen under fuzzy control

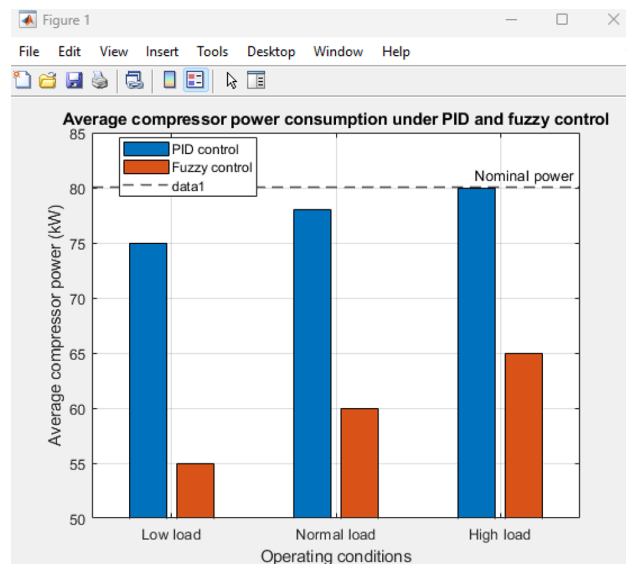


Fig. 5. Average compressor power consumption under PID and fuzzy control

commonly observed in PID-controlled aeration systems were significantly reduced. The absence of abrupt control actions confirms the suitability of fuzzy logic for processes with time delays and uncertain dynamics, such as biological wastewater treatment.

The simulation results confirm that the fuzzy logic–based aeration control system:

- ensures stable dissolved oxygen concentration under variable process conditions;
- adapts effectively to changes in organic load, temperature, and pH;
- reduces compressor energy consumption by up to 25 %;
- improves dynamic stability and minimizes oscillatory behavior.

These results demonstrate the potential of fuzzy logic control as an effective and energy-efficient alternative to conventional aeration control strategies in biological wastewater treatment plants.

Discussion

The obtained results confirm that the proposed fuzzy logic-based aeration control system provides a technically justified and energy-efficient solution for regulating dissolved oxygen concentration in biological wastewater treatment processes. In contrast to classical PID control, which relies on linearized models and fixed tuning parameters, the fuzzy controller effectively accounts for the nonlinear and multivariable nature of the aeration process.

The ability of the fuzzy controller to maintain dissolved oxygen concentration within the optimal range of 1.5–2.5 mg/L under varying organic and hydraulic loads can be explained by the linguistic representation of process variables and the rule-based decision mechanism. Unlike PID controllers, which react only to the deviation of a single control variable, the fuzzy controller simultaneously considers multiple influencing factors, including BOD, temperature, pH, and activated sludge concentration. This multivariable approach allows the controller to adjust aeration intensity proactively rather than reactively, thereby preventing oxygen deficiency or oversupply.

One of the most important practical outcomes of this study is the reduction in compressor energy consumption. The achieved 12–25 % decrease in average power usage compared to PID-based control aligns with reported energy-saving potentials in aeration systems, where air supply accounts for up to 70 % of total energy consumption. The smoother power profiles under fuzzy control reduce mechanical stress on blowers, which is expected to extend equipment lifetime and lower maintenance costs. These benefits are particularly relevant for wastewater treatment plants operating under variable influent conditions and seasonal fluctuations.

Despite these advantages, it should be noted that the results are based on a simulation model and expert-defined rule sets. The effectiveness of the fuzzy controller depends on the quality of the membership functions and rule base, which may require adaptation for specific treatment facilities. Furthermore, while the proposed approach reduces reliance on precise mathematical models, practical implementation would still require reliable sensor data and appropriate integration with existing automation systems.

Overall, the discussion of results indicates that fuzzy logic-based aeration control represents a promising alternative to conventional control strategies, particularly in systems characterized by uncertainty, nonlinear dynamics, and variable operating conditions. The developed control framework provides a flexible foundation for further enhancement, including experimental validation and the integration of adaptive or learning-based algorithms to further improve performance and robustness.

Conclusion

As can be seen from the above, the concentration of dissolved oxygen in aeration tanks depends on many factors, including aeration intensity, temperature, organic load, and physicochemical parameters. Mathematical models, such as mass transfer equations, allow these dependencies to be described, but their use is limited by complexity and uncertainty. The advantages are: resistance to uncertainty and parameter variability, ease of implementation of rules based on expert knowledge, and reduced energy consumption through adaptive control. The application of fuzzy logic provides an effective tool

for controlling aeration under variable parameters, ensuring a balance between treatment quality and energy consumption. Further research may focus on integrating fuzzy systems with machine learning to improve control accuracy.

References

- [1] Makhmudov M., Timirov K., Nurov S. Development of an energy-saving control scheme for the aeration process during biological wastewater treatment. *AIP Conference Proceedings*, 2025, 3331(1): 030012. <https://doi.org/10.1063/5.030012>
- [2] Siddiqova S., Mirzoyev N., Nurov S., Sayfiyev K. Research and development of active and reactive power balance control system in the power supply system of a solar power plant. *AIP Conference Proceedings*, 2025, 3331(1): 030003. <https://doi.org/10.1063/5.030003>
- [3] Makhmudov M.I., Kuziev Z.E., Nurov S.S., Sidikov S.S. Optimal ratio of primary and secondary clarifier characteristics in wastewater treatment plants. *Chemical Technology, Control and Management*, 2020(4): Article 1.
- [4] Makhmudov M., Nurov S., Qo'ziev Z., Sidiqov S. Review and analysis of methods for measuring concentration of suspended substances and active sludge during biological treatment of wastewater. *Scientific Technical Journal*, 2021, 4(3): 45–52.
- [5] Nurov S., Sultanov B.F., Ochilov I.K., Abazov R.F. Pollution monitoring: A solution to improve the quality of wastewater treatment from household emissions. *E 3S Web of Conferences*, 2024, 574: 05003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202457405003>
- [6] Mirzoyev N.N., Nurov S.S. Control and management of the balance of active and reactive power in a power supply system with a solar power plant. *Chemical Technology, Control and Management*, 2024(3): Article 4. <https://doi.org/10.59048/2181-1105.1571>
- [7] Mirzaev N.N. Study on computerized measurement-control system for determining the condition of electrical network insulation and permitted connections for electrical energy consumption. *E 3S Web of Conferences*, 2023, 434: 01021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343401021>
- [8] Idrisovich M.M., Kuziev Z.E., Nurov S.S., Sidikov S.S. Assessment of energy saving capabilities in air blowers of biological wastewater treatment plants. *European Journal of Molecular & Clinical Medicine*, 2020, 7(6): 1474–1486.
- [9] Igamberdiev H., Mamirov U., Tulyaganov S. Stable estimation of regulator parameters in direct adaptive control systems for dynamic objects. In: Aliev R.A. et al. (Eds.), *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2024, vol. 912. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53488-1_42
- [10] Idrisovich M.M., Esanovich K.Z., Sobirovich N.S., Ugli S.S.S. Analysis of the process of aerobic stabilization of sediment on the example of purification facilities of the Republic of Uzbekistan. *Annals of the Romanian Society for Cell Biology*, 2021, 25(3): 7094–7105.
- [11] Idrisovich M.M., Esanovich K.Z., Sobirovich N.S. Assessment of energy saving capabilities in air blowers of biological wastewater treatment plants. *Journal of Critical Reviews*, 2020, 7(11): 3058–3066.