

ISSN 2663-4228 (Print)
ISSN 2663-4236 (Online)

Вестник Донецкого национального университета



НАУЧНЫЙ
ЖУРНАЛ

*Основан в 1997 году,
«Серия Г: Технические науки»
основана в 2018 году*

Серия Г:
Технические
науки

3/2025

Редакционная коллегия журнала
«Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки»

Главный редактор – д-р техн. наук, проф. **В.В. Данилов.**

Зам. главного редактора – канд. техн. наук, доц. **И.А. Третьяков.**

Ответственный секретарь – канд. техн. наук **Е.Д. Пометун.**

Члены редколлегии: д-р техн. наук, проф. **Г.В. Аверин**; д-р техн. наук, проф. **Л.В. Алексейчик**; канд. физ.-мат. наук, с.н.с. **П.В. Асланов**; канд. техн. наук, доц. **Т.С. Башевая**; д-р техн. наук, доц. **И.А. Бершадский**; д-р техн. наук, проф. **А.Б. Бирюков**; д-р техн. наук, проф. **С.В. Борщевский**; д-р техн. наук, доц. **К.А. Выговтов**; д-р техн. наук, проф. **С.А. Горожанкин**; канд. техн. наук, доц. **С.В. Гридин**; канд. техн. наук, доц. **Т.В. Ермоленко**; канд. техн. наук, доц. **Т.В. Завадская**; д-р техн. наук, доц. **А.В. Звягинцева**; д-р техн. наук, доц. **С.А. Зори**; д-р техн. наук, доц. **В.В. Карнаух**; канд. техн. наук, с.н.с. **А.А. Курушин**; канд. техн. наук, доц. **И.А. Молоковский**; д-р техн. наук, проф. **Н.Г. Насонкина**; канд. техн. наук, доц. **В.В. Паслён**; д-р техн. наук, проф. **А.С. Петров**; д-р хим. наук, проф. **А.И. Сердюк**; академик РАН, д-р техн. наук, проф. **И.А. Соколов**; канд. физ.-мат. наук, доц. **В.И. Тимченко**; д-р техн. наук, проф. **В.К. Толстых**; д-р техн. наук, проф. **М.Н. Чепцов**; д-р техн. наук, доц. **Д.В. Шевцов**; канд. техн. наук, доц. **О.Г. Шелехова.**

The Editorial Board of the journal
«Bulletin of Donetsk National University. Series G: Technical Sciences»

The Editor-in-Chief – Dr. of tech., prof. **V.V. Danilov.**

The Deputy of the Editor-in-Chief – Cand. of tech., doc. **I.A. Tretiakov.**

Assistant Editor – Cand. of tech. **E.D. Pometun.**

The Members of the Editorial Board: Dr. of tech., prof. **G.V. Averin**; Dr. of tech., prof. **L.V. Alekseichik**; Cand. of phys. and math., s. researcher **P.V. Aslanov**; Cand. of tech., doc. **T.S. Bashevaia**; Dr. of tech., doc. **I.A. Bershadskii**; Dr. of tech., prof. **A.B. Biriukov**; Dr. of tech., prof. **S.V. Borshchevskii**; Dr. of tech., doc. **K.A. Vytovtov**; Dr. of tech., prof. **S.A. Gorozhankin**; Cand. of tech., doc. **S.V. Gridin**; Cand. of tech., doc. **T.V. Ermolenko**; Cand. of tech., doc. **T.V. Zavadskaia**; Dr. of tech., doc. **A.V. Zviagintseva**; Dr. of tech., doc. **S.A. Zori**; Dr. of tech., doc. **V.V. Karnaukh**; Cand. of tech., s. researcher **A.A. Kurushin**; Cand. of tech., doc. **I.A. Molokovskii**; Dr. of tech., prof. **N.G. Nasonkina**; Cand. of tech., doc. **V.V. Paslen**; Dr. of tech., prof. **A.S. Petrov**; Dr. of chem., prof. **A.I. Serdiuk**; RAS Academician, Dr. of tech., prof. **I.A. Sokolov**; Cand. of phys. and math., doc. **V.I. Timchenko**; Dr. of tech., prof. **V.K. Tolstykh**; Dr. of tech., prof. **M.N. Shevtsov**; Dr. of tech., doc. **D.V. Shevtsov**; Cand. of tech., doc. **O.G. Shelekhova.**

Адрес редакции: 283001, Российская Федерация, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, пр. Театральный, д. 13.

E-mail: vestnik.g@mail.ru

URL: <http://donnu.ru/vestnikG>

С 12.02.2024 г. журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (**Перечень ВАК РФ**) (категория **К2** с 13.12.2024 г.) по следующим научным специальностям и соответствующей им отрасли (технические науки):

- 2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры,
- 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы,
- 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения,
- 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций,
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика,
- 2.3.2. Вычислительные системы и их элементы,
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами,
- 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей,
- 2.3.8. Информатика и информационные процессы,
- 2.4.1. Теоретическая и прикладная электротехника,
- 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы,
- 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника.

Журнал включен в национальную информационно-аналитическую систему **РИНЦ** (Лицензионный договор № 378-06/2016 от 24.06.2016 г. в ред. от 27.03.2019 г.): http://elibrary.ru/title_about_new.asp?id=69984

Журнал включен в международную индексационную наукометрическую базу **Index Copernicus International Journals Master List**: <http://journals.indexcopernicus.com/search/details?id=63327>

*Издается по решению Ученого совета ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»:
Протокол №10 от 03.09.2025 г.*

**Вестник
Донецкого
национального
университета**

Серия Г: Технические науки

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ,
СЕРИЯ Г ОСНОВАНА В 2018 ГОДУ

Номер посвящён 60-летию
кафедры радиофизики и
инфокоммуникационных технологий

№ 3/2025

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

- Панарин В.М., Маслова А.А., Гришакова О.В.* Совершенствование информационно-измерительных и управляющих систем мониторинга экологического состояния атмосферного воздуха промышленно развитых территорий 5
- Шелехова О.Г., Черникова Л.В., Белик Т.В., Долбеиценов В.В.* Анализ методов оценки надежности радиотехнических устройств 18
- Наумов М.А., Карповский А.Ю., Курносков В.Г.* Изучение влияние скорости кодирования на расстояние, время и скорость передачи данных по беспроводной связи LoRa 24
- Остроумов О.А., Базир Г.И., Бычковский М.М., Лепешкин О.М.* Методика предиктивного контроля процесса функционирования сложной технической системы 41
- Звягин Л.С.* Использование байесовского подхода к обработке данных и принятию решений в информационно-измерительных системах для повышения точности в условиях неопределенности и неполноты информации 55
- Яремко Д.И., Турупалов В.В., Яремко И.Н.* Количественная оценка влияния метеорологических факторов на надёжность атмосферных оптических линий связи 68

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

- Зайцев В.А., Червинский В.В.* Анализ проблем современных систем управления технологическим процессом кислородно-конвертерной плавки 77
- Маренич М.К., Гуляева И.Б.* Локализация датчиков контакта фазы в структуре асинхронных двигателей как завершающий компонент при построении системы автоматической защиты электротехнического комплекса участка шахты 86
- Левина Т.М., Альмухаметова Э.И., Сафронов Д.И., Ушаков А.С.* Разработка цифрового двойника лабораторного стенда электродвигателя с нейросетевым прогнозом 98
- Assalata L., Potekhin V.V.* Hand gesture recognition using sEMG with LSTM 103
- Прокопьев А.П.* Концепция построения гетерогенной многоагентной системы для управления укладкой и уплотнением асфальтобетонной смеси 113

<i>Третьяков И.А., Данилов В.В.</i> Элементы вычислительных средств для реализации алгоритма интегральных преобразований в АСНИ радиосигналов	124
<i>Пономарёв Д.С.</i> Применение методов k-средних и DBSCAN для оптимизации производственных процессов с примерами на python	133
<i>Николенко Т.А., Ермаков Н.В., Данилов О.Ф.</i> Оптимизация работы регистратур и зон ожидания в медицинских организациях на основе автоматизированного мониторинга с применением компьютерного зрения	140
<i>Тугашова Л.Г.</i> Применение интегрального показателя переменной структуры при выборе научного журнала	154

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<i>Ряжских А.В.</i> Прогнозирование теплопроводности наножидкостей с учетом полидисперсности наночастиц	162
<i>Володин Ю.Г.</i> Экспериментальное изучение теплообмена при резком увеличении температуры рабочего тела	168
<i>Надеев А.А., Кожухов Н.Н., Прутских Д.А., Дубанин В.Ю.</i> Исследование гидродинамики погружного теплообменного элемента с кольцевыми трубками для аппарата с псевдооживленным слоем	174
<i>Dmitriev A.V., Iakimov N.V., KHarkov V.V., Utkin M.O.</i> Calculation of heat removal from a pipe buried in the soil	184
<i>Карнаух В.В., Бирюков А.Б., Панюжев А.А.</i> Применение регрессионного анализа для прогнозирования работы малогабаритной пленочной градирни	198
<i>Миханошин В.В., Бурков А.Ф.</i> Повышение надёжности и энергоэффективности судовых электроприводов	208
<i>Шиманова А.Б., Пулькина А.Ю., Галкина Н.В., Карнаух В.В., Сармин Д.В.</i> Парето-анализ контура регазификации криогенной системы аккумулирования энергии, работающей по циклу Ренкина с регенерацией тепла	216
<i>Копейка Д.В.</i> Потенциальная эффективность использования солнечной энергии для климатических и погодных условий г. Донецк	227

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<i>Хуррамов М.Г., Назиров З.Ш., Джураева Н.Б.</i> Исследование показателей горячности отложений технологических стоков на полях естественной фильтрации газоперерабатывающих предприятий	234
--	-----

ИНФОРМАЦИОННАЯ РУБРИКА

60-летию кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий	240
Правила для авторов	250

CONTENTS

**ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT ENGINEERING
AND COMMUNICATION**

- Panarin V.M., Maslova A.A., Grishakova O.V.* Improvement of information-measuring and control systems for monitoring the ecological state of atmospheric air in industrially developed territories 5
- SHelekhova O.G., CHernikova L.V., Belik T.V., Dolbeshchenkov V.V.* Analysis of methods for assessing the reliability of radio engineering devices 18
- Naumov M.A., Karpovskii A.IU., Kurnosov V.G.* Studying the effect of encoding speed on the distance, time and data transfer rate over the LoRa wireless connection 24
- Ostroumov O.A., Bazir G.I., Bychkovskii M.M., Lepeshkin O.M.* Method of predictive control of the functioning process of a complex technical system 41
- Zviagin L.S.* Using a Bayesian approach to data processing and decision-making in information and measurement systems to improve accuracy in conditions of uncertainty and incompleteness of information 55
- IAremko D.I., Turupalov V.V., IAremko I.N.* Quantitative assessment of the influence of meteorological factors on the reliability of free space optical communications 68

INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

- Zaitsev V.A., CHervinskii V.V.* Analysis of the problems of modern control systems for the technological process of basic-oxygen steelmaking 77
- Marenich M.K., Guliaeva I.B.* Localization of phase contact sensors in the structure of asynchronous motors as a final component in the construction of the automatic protection system of the electrical complex of the mine site 86
- Levina T.M., Almukhametova E.I., Safronov D.I., Ushakov A.S.* Development of a digital twin of a laboratory electric motor test bench with neural network forecasting 98
- Assalama L., Potekhin V.V.* Hand gesture recognition using sEMG with LSTM 103
- Prokopen A.P.* Heterogeneous multi-agent system for optimizing asphalt concrete mix paving and compaction processes 113

<i>Tretiakov I.A., Danilov V.V.</i> Elements of computing facilities for the implementation of the algorithm of integral transformations in ASRS of radio signals	124
<i>Ponomarev D.S.</i> Application of k-means and DBSCAN methods for optimizing production processes with python examples	133
<i>Nikolenko T.A., Ermakov N.V., Danilov O.F.</i> Optimization of registration and waiting areas in medical organizations based on automated monitoring using computer vision	140
<i>Tugashova L.G.</i> Application of the integral indicator of the variable structure in the selection of a scientific journal	154

ENERGETICS AND ELECTRICAL ENGINEERING

<i>Riazhskikh A.V.</i> Prediction of thermal conductivity of nanofluids taking into account the polydispersity of nanoparticles	162
<i>Volodin I.U.G.</i> Experimental study of heat transfer with a sharp increase in the temperature of the working fluid	168
<i>Nadeev A.A., Kozhukhov N.N., Prutskikh D.A., Dubanin V.I.U.</i> Study of hydrodynamics of submersible heat exchange element with annular tubes for apparatus with fluidized bed	174
<i>Dmitriev A.V., IAKimov N.V., KHarkov V.V., Utkin M.O.</i> Calculation of heat removal from a pipe buried in the soil	184
<i>Karnaikh V.V., Biriukov A.B., Paniuzhev A.A.</i> An application of regression analysis to predict the performance of a small-size film cooling tower	198
<i>Mikhanoshin V.V., Burkov A.F.</i> Improving the reliability of marine electric drives	208
<i>SHimanova A.B., Pulkina A.I.U., Galkina N.V., Karnaikh V.V., Sarmin D.V.</i> Pareto analysis of the regasification contour of a cryogenic energy storage system operating on a Rankine cycle with heat recovery	216
<i>Kopeika D.V.</i> Potential effectiveness of solar energy using for Donetsk climate and weather condition	227

TECHNOSPHERE SAFETY

<i>KHurramov M.G., Nazirov Z.SH., Dzhuraeva N.B.</i> Study of hot indicators of technological water deposits on natural filtration fields of gas processing enterprises	234
---	-----

INFORMATION SECTION

60th anniversary of the Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies	240
Instructions for authors	250

Э Л Е К Т Р О Н И К А , Ф О Т О Н И К А ,
П Р И Б О Р О С Т Р О Е Н И Е И С В Я З Ъ



EDN BSMCQX
УДК 502.7:502.55

DOI 10.5281/zenodo.17394796

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И
УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ПРОМЫШЛЕННО РАЗВИТЫХ
ТЕРРИТОРИЙ**

© 2025 *Панарин В.М., Маслова А.А., Гришакова О.В.*

В данной работе приведено описание информационно-измерительной и управляющей системы мониторинга экологического состояния атмосферного воздуха промышленно развитых территорий как важнейшего инструмента мониторинга и управления качеством окружающей среды, особенно в условиях крупных промышленных центров и городов. Представлена структурная схема предлагаемой системы, а также структуры ситуационного центра Губернатора, центра экологического мониторинга и постов мониторинга. Приведены примеры практической реализации системы.

Ключевые слова: экологический мониторинг, загрязнение атмосферы, ситуационный центр, принятие решений, информационно-измерительная система, промышленно развитая территория.

Введение. В 2018 году Президент Российской Федерации утвердил перечень национальных проектов страны, одним из которых стал самостоятельный проект «Экология», направленный на постепенное сокращение вдвое уровня вредных выбросов в атмосферу городов с высокой степенью загрязненности к 2036 году [1]. Усиливающееся внимание общества, государства и граждан к вопросам экологии обуславливает необходимость разработки и реализации инициатив, позволяющих оперативно справляться как с глобальными проблемами изменения климата, вызванными антропогенной активностью, так и с региональными локальными вопросами охраны природы [2].

Федеральный закон № 252-ФЗ от 29 июля 2018 года уделяет особое внимание внедрению информационно-измерительных систем мониторинга загрязнения атмосферы. Предприятия, относящиеся к объектам первой категории негативного воздействия на окружающую среду, обязаны оснащаться автоматизированными комплексами, предназначенными для непрерывного измерения и учёта уровней выбросов загрязняющих веществ и стоков. Эти системы должны обеспечивать фиксацию конкретных показателей загрязнений и передачу полученной информации в единый государственный реестр объектов, отрицательно влияющих на состояние природной среды. Данный подход направлен на повышение эффективности экологического контроля и обеспечение прозрачности деятельности предприятий, способствующих снижению негативных последствий промышленного производства для здоровья населения и состояния экосистем [3].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-24-20012, <https://rscf.ru/project/25-24-20012/>, а также по соглашению о предоставлении из бюджета Тульской области гранта в форме субсидий №30-2025-000524 от 03.04.2025.

Информационно-измерительные и управляющие системы мониторинга экологического состояния атмосферного воздуха являются важнейшим инструментом мониторинга и управления качеством окружающей среды, особенно в условиях крупных промышленных центров и городов. Современная промышленность оказывает значительное влияние на состояние атмосферы, приводя к выбросам загрязняющих веществ, ухудшению качества жизни населения и росту рисков заболеваний дыхательной системы [4].

Актуальность и важность данной темы подтверждается следующими моментами:

- усиление антропогенной нагрузки – рост промышленности и увеличение транспортных потоков приводят к увеличению выбросов вредных веществ в атмосферу;

- повышение требований общества – население становится более информированным и требовательным к качеству окружающей среды;

- необходимость соблюдения норм законодательства – строгие требования государственных стандартов требуют постоянного контроля уровня загрязнения;

- экономические последствия – загрязненный воздух увеличивает расходы здравоохранения и снижает производительность труда.

Разработка и внедрение информационных и измерительно-управляющих систем мониторинга экологического состояния атмосферного воздуха промышленно развитых территорий позволяет эффективно решать следующие задачи [5]:

- мониторинг состояния атмосферного воздуха – современные информационные технологии позволяют получать точные данные о концентрации загрязнителей в режиме реального времени, что обеспечивает возможность быстрого реагирования на изменения экологической ситуации и принятие оперативных мер по снижению негативного воздействия;

- прогнозирование изменений – анализ больших объемов данных позволяет создавать модели, предсказывающие возможные сценарии развития ситуации, что помогает заранее подготовиться к неблагоприятным условиям и минимизировать риски для здоровья населения;

- автоматизация процессов управления – автоматизированные системы обеспечивают оптимизацию управленческих решений, снижают затраты на мониторинг и повышают эффективность мероприятий по улучшению экологии;

- повышение осведомленности общественности – открытый доступ к данным о состоянии атмосферы способствует повышению уровня осознанности среди жителей и стимулирует участие гражданского общества в охране окружающей среды;

Таким образом, тема совершенствования информационно-измерительных и управляющих систем экологическим состоянием атмосферного воздуха промышленно развитых территорий является крайне актуальной и важной для устойчивого развития регионов и улучшения качества жизни населения.

Структурная схема информационно-измерительной и управляющей системы мониторинга экологического состояния атмосферного воздуха промышленно развитых территорий. В Тульской области разработана информационно-измерительная и управляющая система мониторинга экологического состояния атмосферного воздуха промышленно развитых территорий. Это действительно важная инициатива, направленная на повышение эффективности мониторинга и управления качеством атмосферного воздуха в промышленно развитых регионах.

Структура информационно-измерительной и управляющей системы мониторинга экологического состояния атмосферного воздуха является многоуровневой и комплексной системой, позволяющей осуществлять контроль и управление ситуацией на разных уровнях ответственности и компетенции. Такая организация системы направлена на повышение точности и надежности результатов мониторинга, своевременное выявление проблемных ситуаций и оперативное принятие необходимых мер по устранению негативных факторов [6-7].

На рис. 1 представлена структурная схема информационно-измерительной и управляющей системы мониторинга экологического состояния атмосферного воздуха промышленно развитых территорий.

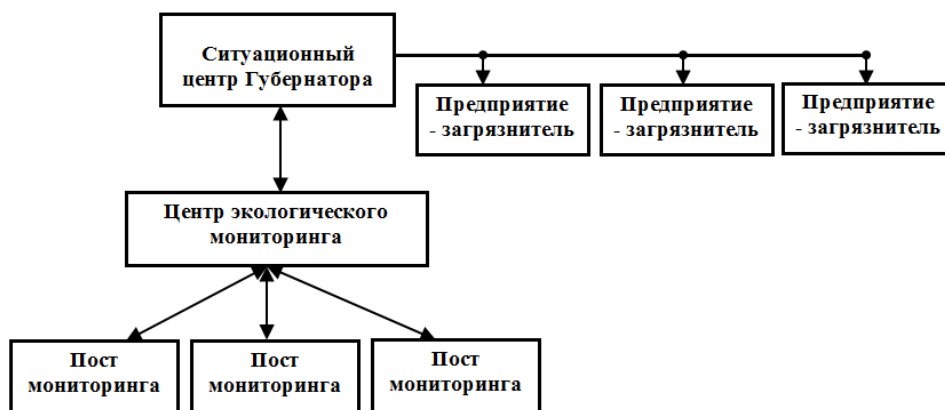


Рис. 1. Структурная схема информационно-измерительной и управляющей системы мониторинга экологического состояния атмосферного воздуха промышленно развитых территорий

В предлагаемой системе имеются следующие уровни:

Уровень 1 – Ситуационный центр губернатора. Этот уровень представляет собой высший орган управления системой мониторинга. Здесь принимаются стратегические решения, направленные на улучшение экологической обстановки и минимизацию влияния промышленных предприятий на окружающую среду. На рис. 2 представлена структура ситуационного центра Губернатора.

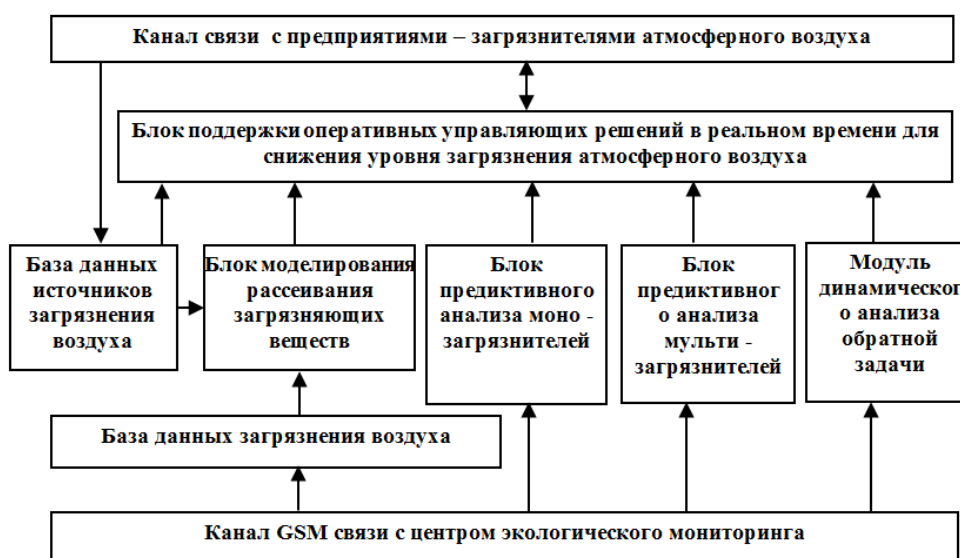


Рис. 2. Структура ситуационного центра Губернатора

Ситуационный центр губернатора состоит из отдельных блоков. Представленные блоки составляют основу многофункциональной системы ситуационного центра губернатора, предназначенного для эффективного мониторинга и оперативного управления уровнем загрязнения атмосферного воздуха. Каждый блок играет ключевую роль в функционировании всей системы, обеспечивая интеграцию данных, поддержку принятия решений и взаимодействие между различными участниками процесса.

Рассмотрим подробнее назначение и особенности каждого блока:

1. Канал связи с предприятиями-загрязнителями воздуха. Данный канал предназначен для прямой коммуникации с предприятиями, являющимися источниками выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Через этот канал осуществляется передача предупреждений и рекомендаций относительно режима работы предприятий, направленных на снижение уровня выбросов. Этот элемент важен для координации действий администрации региона и предприятий в целях предотвращения аварийных ситуаций и минимизации ущерба окружающей среде.

2. Блок поддержки принятия оперативных управляющих решений в реальном времени. Задача этого блока заключается в предоставлении руководителям инструментов для оперативного анализа ситуации и выбора наиболее адекватных методов управления уровнем загрязнения. В зависимости от характера и интенсивности загрязнений здесь формируются рекомендации по режимам эксплуатации производственных мощностей, транспортному движению и другим аспектам хозяйственной деятельности.

3. База данных источников загрязнения атмосферного воздуха. Эта база хранит исчерпывающую информацию обо всех предприятиях и объектах, являющихся потенциальными источниками выбросов загрязняющих веществ. Данные включают местоположение объекта, характеристики производства, объем выбросов и другие важные показатели. Данная информация необходима для оценки общего вклада каждой организации в общий фон загрязнения и выявления возможных точек вмешательства.

4. Блок моделирования рассеивания загрязняющих веществ предназначен для расчета путей распространения выбрасываемых предприятием загрязняющих веществ в атмосфере. Использует методы численного моделирования, учитывающие погодные условия, рельеф местности и другие факторы, влияющие на распространение примесей. Результаты расчетов используются для определения зон повышенного риска и планирования профилактических мероприятий.

5. Блок предиктивного анализа моно-загрязнителей осуществляет анализ динамики одного конкретного типа загрязнителя, определяя вероятные сценарии его поведения в будущем. Такой анализ необходим для заблаговременного предупреждения опасных ситуаций и подготовки соответствующих мер реагирования.

6. Блок предиктивного анализа мульти-загрязнителей аналогичен предыдущему блоку, однако осуществляет комплексный анализ взаимодействия нескольких типов загрязнителей одновременно. Данный подход позволяет учитывать синергизм эффектов и строить более реалистичные модели развития экологической ситуации.

7. Модуль динамического анализа обратной задачи используется для реконструкции истории возникновения конкретной концентрации загрязняющего вещества в определенной точке пространства. Позволяет определить источник загрязнения ретроспективно, что важно для расследования случаев нарушения норм экологической безопасности.

8. База данных загрязнителей атмосферного воздуха хранит информацию о характеристиках и свойствах различных видов загрязняющих веществ, включая их воздействие на здоровье человека и экосистемы. Используется специалистами для интерпретации данных наблюдений и формирования обоснованных выводов о степени угрозы.

9. Канал связи с ситуационным центром экологического мониторинга обеспечивает бесперебойную передачу данных между пунктами мониторинга и центральным органом управления системой. GSM-технологии гарантируют доступность канала даже в удалённых районах, обеспечивая полную охватываемость территории контролируемым процессом.

Каждый из перечисленных элементов взаимодействует друг с другом, образуя целостную систему, способствующую эффективному управлению качеством атмосферного воздуха и поддержанию благоприятной экологической обстановки в регионе.

Уровень 2 — это научно-технический аппарат, осуществляющий обработку поступающих данных и выдачу рекомендаций по дальнейшему развитию ситуации. На рис. 3 показана структурная схема центра экологического мониторинга.

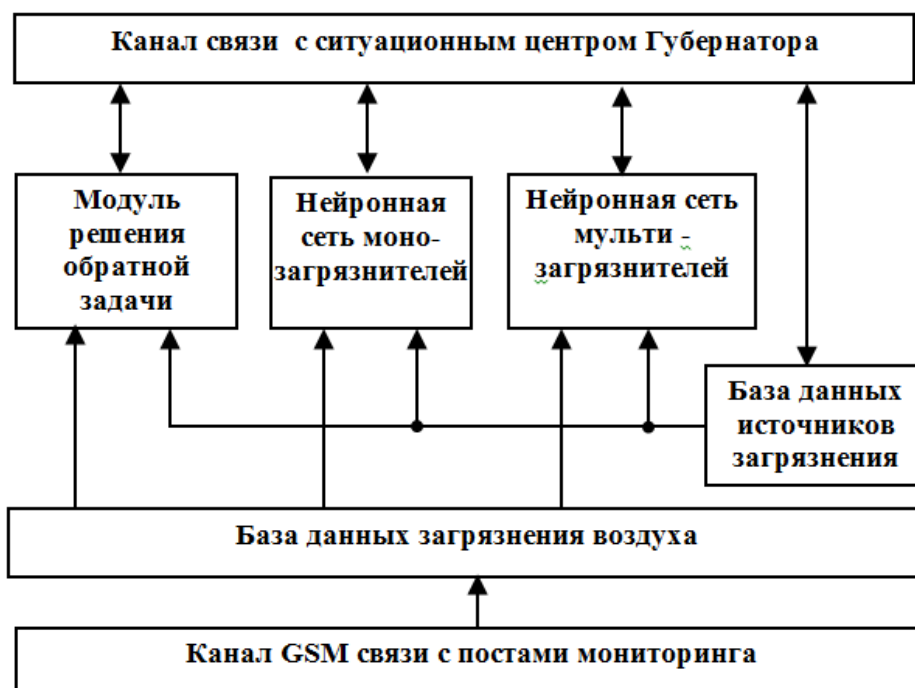


Рис. 3. Структурная схема центра экологического мониторинга

Представленный состав блоков центра экологического мониторинга отражает комплексное решение, объединяющее различные элементы информационного обмена, аналитики и управления данными. Рассмотрим детально каждую составляющую блока и её функциональное значение:

1. Канал связи с ситуационным центром губернатора за загрязнением атмосферного воздуха. Основная задача этого канала – обеспечивать стабильную связь и обмен информацией между центром экологического мониторинга и верхним уровнем управления, представленным ситуационным центром губернатора. Благодаря этому обеспечивается координация действий органов исполнительной власти и организаций, занимающихся вопросами защиты окружающей среды.

2. Модуль решения обратной задачи. Этот модуль занимается реконструкцией события путем вычисления источника загрязнения по известным параметрам его проявления в заданной зоне. Например, по зафиксированной концентрации загрязняющего вещества определяется объект, ответственный за выброс. Решение обратных задач важно для идентификации нарушителей норм экологической безопасности и выявления скрытых угроз.

3. Нейронная сеть моно-загрязнителей использует методы машинного обучения для анализа тенденций и прогнозирования поведения одиночных загрязнителей в воздухе. Способна выявить паттерны появления конкретных загрязняющих веществ и спрогнозировать развитие ситуации на основании накопленных данных. Применяется для краткосрочного и среднесрочного прогнозирования состояния окружающей среды.

4. Нейронная сеть мульти-загрязнителей. Расширенная версия предыдущей нейронной сети, работающая с несколькими типами загрязнителей одновременно. Учёт совместного влияния множества факторов позволяет создать более точную картину экологической ситуации и формировать надёжные прогнозы, учитывая взаимное усиление или ослабление эффекта различных веществ.

5. База данных источников загрязнения атмосферного воздуха собирает сведения обо всех зарегистрированных источниках загрязнения атмосферного воздуха на территории региона. Включает информацию о географическом положении объектов, технологической специфике производства, объёмах и характере выбросов. Представляется важным ресурсом для составления комплексного плана мероприятий по предотвращению превышения допустимого уровня загрязнения.

6. База данных загрязнителей атмосферного воздуха. Сборник сведений о химико-физических характеристиках различных видов загрязняющих веществ, встречающихся в атмосферном воздухе. Содержит описание токсичности, пороговых значений и особенностей поведения соединений в реальных условиях. Предназначается для помощи специалистам при оценке последствий воздействия тех или иных загрязняющих веществ на окружающую среду и здоровье человека.

7. Канал GSM-связи с постами мониторинга гарантирует стабильную передачу данных от территориально распределённой сети постов мониторинга непосредственно в центр экологического мониторинга. Благодаря использованию GSM-канала обеспечивается непрерывность поступления информации независимо от наличия проводных коммуникаций, что делает систему менее зависимой от внешних условий.

Совокупность представленных компонентов образует единую структуру, способную отслеживать динамику загрязнения воздуха, проводить глубокий анализ поступающей информации и формировать чёткую стратегию по регулированию качества атмосферного воздуха в промышленно-развитых территориях.

Основные задачи центра заключаются в следующем: сбор и обработка данных с постов мониторинга; проведение анализов и построение моделей распространения загрязнений; формулирование предложений по снижению выбросов; регулярное представление отчетов о результатах мониторинга вышестоящим органам. Экологический мониторинг служит основой для разработки долгосрочных программ охраны окружающей среды и планирования инвестиций в природоохранные мероприятия.

Уровень 3 – Посты мониторинга. Данный уровень представлен сетью стационарных и мобильных пунктов наблюдения за состоянием атмосферного воздуха. Они оснащены современным оборудованием для измерения концентраций основных загрязняющих веществ и передачи полученной информации на второй уровень системы.

Функциональные обязанности постов мониторинга включают: непрерывный сбор данных о качестве воздуха; передача информации в автоматизированном режиме; первичная обработка собранных данных; информирование местного населения о текущих показателях качества воздуха; эффективность функционирования каждого поста зависит от качества используемого оборудования и профессионализма персонала, обеспечивающего его эксплуатацию.

На рис. 4 представлена структурная схема поста мониторинга.

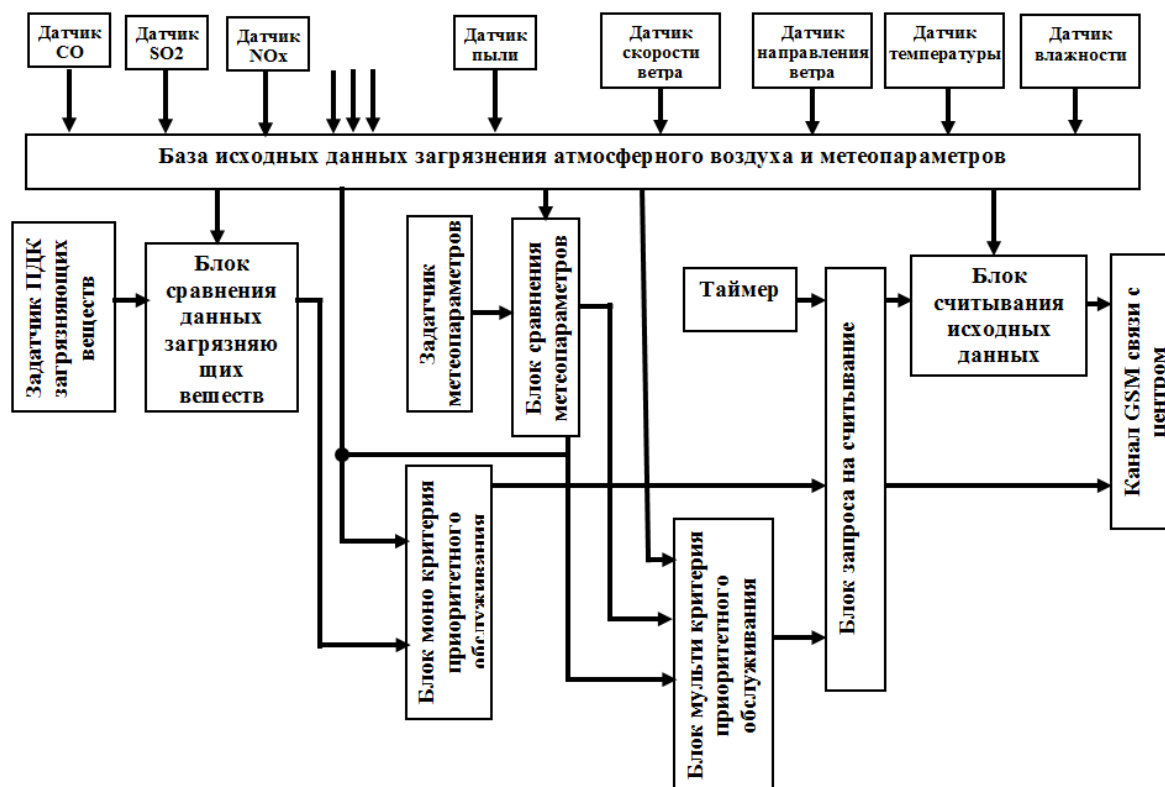


Рис. 4. Структурная схема поста мониторинга

Пост мониторинга представляет собой специализированную установку, предназначенную для непрерывного контроля уровня загрязнения атмосферного воздуха и передачи соответствующей информации в центры экологического мониторинга. Рассмотрим структурную схему поста мониторинга и разберем функциональность каждого блока.

1. Датчики концентрации загрязняющих веществ. Это основное устройство, регистрирующее содержание различных загрязняющих веществ в атмосфере. Эти датчики непрерывно собирают данные о содержании различных загрязняющих веществ (например, диоксида серы, оксида азота, взвешенных частиц PM2.5 и PM10 и др.) [8].

2. База исходных данных загрязнения атмосферного воздуха и метеопараметров записывает и сохраняет собранные датчиками данные о составе воздуха и сопутствующих погодных параметрах (температура, влажность, давление). Предоставляет аналитику необходимую информацию для дальнейшего анализа и оценок.

3. Задатчик предельно допустимых концентраций (ПДК) устанавливает границы допустимых концентраций загрязняющих веществ согласно санитарным нормам и правилам. Используется для последующей оценки соответствия фактических показаний установленным стандартам.

4. Блок сравнения данных загрязняющих веществ производит сравнение реально замеренных показателей с установленными нормами ПДК. Если фиксируется превышение нормы, инициируется сигнал тревоги или предупреждение.

5. Задатчик метеопараметров определяет базовые значения климатических параметров (температуры, влажности, давления), необходимые для сопоставления и коррекции данных.

6. Блок сравнения метеопараметров проверяет соответствие текущих атмосферных условий установленным базовым показателям. Корректирует показания датчиков, если выявлены отклонения, обусловленные изменением погоды.

7. Блок моно-критерия приоритетного обслуживания применяется для определения приоритета сигналов тревоги или оповещений, связанных с одним типом загрязняющего вещества. Учитывается степень превышения нормы и возможное негативное воздействие на здоровье человека.

8. Блок мульти-критерия приоритетного обслуживания реализует алгоритм обработки одновременных тревог от нескольких загрязняющих веществ. Определяет общую угрозу и формирует итоговую рекомендацию для управляющего органа.

9. Таймер регистрирует временные метки замеров и записей данных. Помогает контролировать периодичность обновлений и оценивать динамику изменений.

10. Блок запроса на считывание инициирует процедуру извлечения информации из базы данных по запросу центрального узла мониторинга.

11. Блок считывания исходных данных отвечает за непосредственное получение и преобразование сигнала от датчиков в цифровую форму, пригодную для хранения и дальнейшей обработки.

12. Канал GSM-связи с центром экологического мониторинга организует беспроводную передачу данных с поста мониторинга в центральный узел, используя технологию мобильной связи стандарта GSM. Обеспечивает надежное функционирование системы вне зависимости от наличия проводных линий связи.

Такая архитектура поста мониторинга обеспечивает надежный сбор и передачу данных о состоянии атмосферного воздуха, создавая надежную основу для мониторинга и управления экологической обстановкой в промышленно развитых зонах.

Практическая реализация информационно-измерительной и управляющей системы мониторинга экологического состояния атмосферного воздуха промышленно развитых территорий. Практическая реализация системы предполагает создание комплекса технических и организационных мер, направленных на эффективный контроль и регулирование уровня загрязнения воздуха. Этапы практической реализации такой системы:

Этап 1: Проектирование системы. Проектирование начинается с анализа существующих условий, выделения приоритетных задач и определения необходимого функционала системы. К основным этапам проектирования относятся: определение целей и задач мониторинга; выбор места расположения станций мониторинга; подбор оборудования (датчиков, серверов, каналов связи); создание архитектуры информационной системы; организация инфраструктуры передачи данных.

Этап 2: Установка и настройка оборудования. Установка оборудования включает монтаж датчиков, серверов и коммуникационной инфраструктуры. Важно правильно выбрать расположение датчиков, чтобы они могли точно регистрировать ключевые показатели загрязнения. Настройка оборудования должна включать калибровку приборов и тестирование работоспособности системы.

Этап 3: Ввод системы в эксплуатацию. Перед началом регулярного мониторинга проводится ввод системы в эксплуатацию. Это включает проверку всех узлов и модулей, настройку программного обеспечения и обучение операторов работе с системой. После успешного завершения тестирования система запускается в штатный режим работы.

Этап 4: Оперативный мониторинг и анализ данных. В процессе эксплуатации системы регулярно собираются и анализируются данные о состоянии атмосферного воздуха. Аналитики интерпретируют полученные данные, формируют отчёты и рекомендации по оптимизации экологической ситуации. Особое внимание уделяется случаям превышения нормативных значений загрязняющих веществ.

Этап 5: Управление ситуацией. При обнаружении нарушений устанавливаются причины отклонений и предпринимаются меры по нормализации ситуации. Это может включать ограничение работы предприятий, изменение маршрутов транспорта или введение временных ограничений на использование определённого вида топлива.

Этап 6: Поддержка и модернизация системы. Для поддержания высокой эффективности системы проводятся регулярные технические осмотры, обновление программного обеспечения и замена устаревшего оборудования. Модернизация системы позволяет адаптироваться к новым требованиям и улучшать качество предоставляемых услуг.

Примером успешной реализации подобного проекта служит система мониторинга атмосферного воздуха, внедрённая в ряде городов Тульской области (Новомосковск, Узловая, Ефремов, Алексин). Данный проект позволил значительно снизить уровень загрязнения воздуха и улучшить качество жизни горожан.

Благодаря внедрению данной системы в Тульской области достигнуты значительные успехи, а именно постоянный мониторинг позволяет быстрее реагировать на рост концентрации загрязняющих веществ, снижая риск превышений ПДК, жители получили доступ к актуальным данным о состоянии воздуха, повышая доверие к действиям властей, посты мониторинга стали частью городской инфраструктуры, помогая развиваться программам улучшения экологии и благоустройству городских пространств.

Разработано специальное программное обеспечение для анализа и визуализации полученной информации, которое предоставляет аналитикам инструменты для детального изучения полученных данных, построения графиков и карт распределения загрязнений, что помогает выявлять закономерности и аномалии, оперативно реагировать на критические ситуации.

Возможности программного обеспечения:

- детальный анализ данных. Приложение предоставляет широкий спектр функций для анализа полученных данных, включающий фильтрацию, сортировку и агрегацию информации. Пользователи могут настраивать критерии отбора данных, выбирать интересующие интервалы времени и типы загрязнений;

- графическое отображение данных. Программа поддерживает разнообразные способы представления данных, такие как графики, диаграммы и карты. Это позволяет наглядно продемонстрировать распределение загрязнений в пространстве и во времени, облегчая восприятие сложной информации;

- алгоритмы обнаружения аномалий. Встроенные алгоритмы автоматически выявляют случаи резкого увеличения концентрации загрязняющих веществ, сигнализируя операторам о потенциальных проблемах. Это помогает своевременно реагировать на нестандартные ситуации и предотвращать негативные последствия;

- создание отчётности. Программное обеспечение позволяет легко составлять отчёты по результатам мониторинга, формируя стандартные формы документов и предоставляя возможность экспорта данных в удобных форматах (PDF, Excel и др.);
- поддержка многопользовательской работы. Несколько специалистов могут одновременно работать с программой, получая актуальные данные и совместно принимая решения. Интерфейс поддерживает многопользовательские сессии и защиту доступа к конфиденциальной информации;
- возможность подключения новых источников данных. Программное обеспечение допускает подключение новых источников данных, что расширяет область охвата мониторинга и повышает его точность.

На рис. 5 представлен общий вид поста мониторинга и его наполнение.



Рис. 5. Общий вид поста мониторинга и его наполнение

Такое программное обеспечение стало незаменимым помощником экологических служб и административных органов, позволяя лучше понимать и управлять сложными процессами загрязнения атмосферного воздуха. На рис. 6 показан общий вид разработанного программного обеспечения системы «Софт:Сигнал»-Ш-С-СИ v.Есо с системами жизнеобеспечения на базе промышленных контроллеров [9].

Опыт использования специализированных приложений доказал свою эффективность, показав, что сочетание точного мониторинга и качественного анализа способно существенно повлиять на экологическую обстановку и повысить комфорт проживания в населённых пунктах [10].

Рабочее место оператора с отображением данных позволяет отображать измеряемые параметры для удобной работы персонала, вести архив данных и событий, формировать отчеты. В состав входит сервер для архивирования данных, визуализационная панель (монитор), клавиатура, мышь, программное обеспечение.



Рис. 6. Общий вид разработанного программного обеспечения системы «Софт:Сигнал»-Ш-С-СИ v.Есо с системами жизнеобеспечения на базе промышленных контроллеров

На рис. 7 представлен ситуационный центр Губернатора Тульской области.



Рис. 7. Ситуационный центр Губернатора Тульской области

Ключевые задачи центра включают: анализ общей картины состояния воздушного бассейна территории; выявление приоритетных направлений деятельности; координация усилий всех подразделений системы; принятие решений о введении специальных режимов эксплуатации объектов и производств. Важнейшей функцией ситуационного центра является предоставление оперативной и достоверной информации руководству региона для выработки эффективных управленческих решений.

Выводы. Таким образом, внедрение информационно-измерительной и управляющей системы мониторинга экологического состояния атмосферного воздуха промышленно развитых территорий позволяет существенно повысить эффективность мониторинга и управления состоянием атмосферного воздуха, обеспечить своевременное реагирование на чрезвычайные ситуации и способствовать формированию устойчивой экологической политики региона.

Подобная система способна стать мощным инструментом реализации государственной стратегии в сфере охраны окружающей среды и защиты здоровья населения.

К преимуществам предлагаемой системы можно отнести:

- повышенную точность измерений, т.е. современные сенсоры обеспечивают высокую чувствительность и надежность данных;
- оперативность реакции, когда информация поступает практически мгновенно, позволяя своевременно предпринимать меры по защите населения от неблагоприятных воздействий;
- прогностический потенциал. Анализ исторических данных и моделирование будущих сценариев помогают предвидеть возможные проблемы и планировать профилактические мероприятия;
- оптимизацию ресурсов. Централизация сбора и обработки данных сокращает издержки на обслуживание инфраструктуры мониторинга.

Данная система может применяться для решения следующих практических задач: оценка текущего состояния воздушной среды; определение зон риска и источников повышенной опасности; разработка планов действий по снижению уровня загрязнения; контроль выполнения нормативов предприятиями и организациями; обеспечение информацией широкой аудитории для повышения осведомленности населения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года: Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 г. № 204 (ред. от 21.07.2020).
2. Об утверждении Концепции совершенствования системы мониторинга загрязнения окружающей среды с учетом конкретизации задач федерального, регионального и локального уровней на 2017-2025 годы: Приказ Росгидромета от 02.02.2017 г № 23.
3. О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и статьи 1 и 5 Федерального закона «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» в части создания систем автоматического контроля выбросов загрязняющих веществ, сбросов загрязняющих веществ: Федеральный закон от 29.07.2018 г. № 252-ФЗ.
4. Лукьянов, О. В. Оснащение стационарных источников выбросов автоматическими средствами контроля / О. В. Лукьянов, М. В. Баюкин, К. К. Нечухин // Экология производства. – 2017. – № 6. – С. 24-28.
5. Информационно-вычислительная система экологической безопасности ООО "Сибэнергоуголь": подходы, методы, модели / В. В. Устинов, В. П. Потапов, Е. Л. Счастливцев [и др.] // Уголь. – 2018. – № 3(1104). – С. 84-90. – DOI 10.18796/0041-5790-2018-3-84-90. – EDN YQRBXK.
6. Степанченко, И. В. Построение систем экологического мониторинга в городах с нестабильной локацией зон опасного загрязнения атмосферного воздуха / И. В. Степанченко // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. – 2015. – № 2(72). – С. 70-75. – EDN VBILFN.
7. Интеллектуальные информационные технологии в экологическом мониторинге / У. У. Умбетов, В. В. Яворский, А. О. Чванова, С. Ж. Байдуллаев // Вестник Чувашского государственного аграрного университета. – 2023. – № 2(25). – С. 215-221. – DOI 10.48612/vch/a1rt-uzge-7d5x. – EDN ROOBNQ.
8. Оснащение стационарных источников вредных (загрязняющих) веществ автоматическими средствами контроля промышленных выбросов объектов 1-ой категории / В. М. Панарин, Н. А. Рыбка, А. А. Маслова [и др.] // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 4 (30). – С. 13-20. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-4-2.
9. Маслова, А. А. Повышение эффективности информационно-измерительной и управляющей системы мониторинга загрязнения атмосферного воздуха промышленного региона в части вопросов, касающихся объективности предоставляемой информации / А. А. Маслова, М. В. Панарин, Н. А. Рыбка // Экологические системы и приборы. – 2020. – № 9. – С. 34-39. – DOI 10.25791/esip.09.2020.1179. – EDN TUBJEB.
10. Автоматизированная система контроля выбросов загрязняющих веществ на источниках промышленных предприятий / М. В. Панарин, А. А. Маслова, С. А. Савинкова, В. М. Панарин // Экология и промышленность России. – 2021. – Т. 25. – № 6. – С. 44-48.

Поступила в редакцию 20.05.2025 г., рекомендована к печати 09.06.2025 г.

**IMPROVEMENT OF INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS FOR
MONITORING THE ECOLOGICAL STATE OF ATMOSPHERIC AIR IN INDUSTRIALLY
DEVELOPED TERRITORIES**

Panarin V.M., Maslova A.A., Grishakova O.V.

This paper describes the information-measuring and control system for monitoring the ecological state of atmospheric air in industrially developed territories as the most important tool for monitoring and managing environmental quality, especially in large industrial centers and cities. A structural diagram of the proposed system is presented, as well as the structure of the Governor's situation center, the environmental monitoring center and monitoring posts. Examples of practical implementation of the system are given.

Keywords: environmental monitoring, air pollution, situational center, decision-making, information and measuring system, industrially developed territory.

Панарин Владимир Михайлович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой охраны труда и окружающей среды ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»,
Российская Федерация, г. Тула.
E-mail: panarin_tsu@yandex.ru

Panarin Vladimir Mikhailovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Occupational Safety and Environment of Tula State University,
Russian Federation, Tula.

Маслова Анна Александровна

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры охраны труда и окружающей среды ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»,
Российская Федерация, г. Тула.
E-mail: anna_zuykova@rambler.ru

Maslova Anna Aleksandrovna

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at Department of Occupational Safety and Environment of Tula State University,
Russian Federation, Tula.

ГришакOVA Ольга Владимировна

аспирант кафедры охраны труда и окружающей среды ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»,
Российская Федерация, г. Тула.
E-mail: olya.grischakova@yandex.ru

Grishakova Olga Vladimirovna

Postgraduate student, Department of Occupational Safety and Environment of Tula State University,
Russian Federation, Tula.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

© 2025 Шелехова О.Г., Черникова Л.В., Белик Т.В., Долбещенков В.В.

Проведен анализ методов оценки надежности радиотехнических устройств. Рост сложности современных радиотехнических устройств требует уточнения методов оценки их безотказности. Выявлены основные направления усовершенствования моделей надежности.

Ключевые слова: надежность, метод, вероятность безотказной работы, радиотехнические устройства.

Введение. В настоящее время радиотехнические устройства (РТУ) активно используются практически во всех отраслях науки и техники, в том числе атомной, космической и военной, топливно-энергетической промышленности и др. [1]. Значение и относительный объем РТУ в технических системах постоянно увеличивается и, соответственно, усложняется их структура [2]. Современные РТУ могут состоять из миллиона элементов [3], отказ каждого из которых может привести к катастрофическим последствиям [1-4].

Трудоемкость и временные затраты на выявление и устранение дефектов в местах их возникновения достаточно велики [5]. Поэтому особую ценность представляет собой возможность диагностирования и прогнозирования, отдельных элементов конструкции РТУ с целью скорейшей замены на исправные и возвращения РТУ в работу. Не обнаруженные своевременно дефекты могут вызвать появление вторичных дефектов, приводящим к более значимым потерям [5, 6].

Практика свидетельствует, что в настоящее время до 70 % отказов при эксплуатации РТУ происходит за счет электрорадиоизделий (ЭРИ) [7]. По статистике наличие всего 2 % дефектных компонентов снижает работоспособность аппаратуры на 30 % и более [7]. Статистика отказов показывает рост выхода из строя оборудования в летний период, находящегося как в закрытых помещениях, так и на открытом воздухе [8]. Практика проектирования и эксплуатации РТУ свидетельствует, что существующие методы оценки недостаточно эффективны [8]. Поэтому в современных условиях очень актуальным является анализ и совершенствование методов оценки безотказности РТУ [2, 9].

Статистика повреждений РТУ вследствие воздействия факторов окружающей среды (температуры, влажности и т.д.) [8] требует усовершенствования и уточнения существующих методов.

Целью данной статьи является анализ методов оценки надежности радиотехнических устройств с целью выявления основных направления их усовершенствования.

Основная часть. Оценка показателей надежности РТУ осуществляется аналитическими и экспериментальными методами [10–30].

Согласно ГОСТ 27.301–95. «Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения» аналитические методы оценки надежности подразделяются на [10]: физические методы расчета [10–19]; структурные методы расчета [20–22].

Физические методы оценки надежности. Под физическими методами оценки понимают определение значений показателей по справочным данным о надёжности элементов объекта, по данным о надёжности изделий-аналогов, по свойствам применяемых в изделии материалов и другой исходной информации [10, 11]. Усовершенствованию физических методов оценки показателей надежности РТУ посвящены работы отечественных и зарубежных авторов [11–21].

Методы обеспечения безопасности и надежности работы РТУ рассмотрены в работах отечественных и зарубежных авторов. Существующие методы определения срока эксплуатации и надежности электронных устройств носят вероятностный характер, и могут давать погрешность до 40 % и более [3]. РТУ могут состоять из миллиона элементов [3], надежность каждого из которых, в свою очередь, определяется громоздкими аналитическими выражениями [3]. Расчет срока службы подобных РТУ, даже с использованием специализированных компьютерных программ может занимать длительное время [3], что не позволяет своевременно принять решение по замене РТУ или его комплектующих.

В работах отечественных авторов Строгонова А.В. [12], Цыбина С.А. [14], Городкова П.С. [14] выполнен сравнительный анализ физических моделей и методов надежности с использованием базовых значений интенсивностей отказов на основании справочника Министерства обороны США MIL-HDBK-217F и отечественного справочника «Надежность ЭРИ» [12–15]. Показано, что модели расчета эксплуатационной интенсивности отказов с использованием отечественного справочника «могут привести к излишне консервативным разработкам и дополнительным расходам в течение жизненного цикла изделия» [12–18].

В работах Иванова И.А. [19], Королева П.С. [19], Полесского С.Н. [19] выявлено, что значения интенсивностей отказов, представляемые фирмами–производителями, могут быть некорректными и зачастую требуют уточнения [19].

Необходимость учета «коэффициента качества производства» при обеспечении требуемого уровня надежности в космической отрасли обоснована в работах Королева П.С. [16, 17], Жаднова В.В. [17, 19], Полесского С.Н. [19], Иванова И.А. [19], Тихменева А.Н. [22]. Метод оценивания показателей безотказности радиотехнических устройств, для космической аппаратуры на этапе проектирования, учитывающий следующие факторы: эффективность функционирования системы менеджмента качества организации-исполнителя; соответствие результатов проектирования требованиям технического задания; качество проведения дополнительных испытаний электрорадиоизделий; качество реализации необходимых мероприятий, содержащихся в нормативно-технической документации предложен Королевым П.С. [16, 17]. Преимущество методики заключается в постоянном контроле необходимых мероприятий, содержащихся в нормативно-технической документации, при проектировании радиотехнических устройств. При этом показана эффективность применения нового метода при оценивании целевого уровня показателей надежности радиотехнических устройств космической аппаратуры [16, 17].

Структурные методы оценки надежности. Согласно ГОСТ Р 51901.14-2005 («МЭК 61078:1991») под структурными методами оценки надежности понимается наглядное представление, графическое или в виде логических соотношений, условий, при которых система или объект находятся в работоспособном состоянии [21–26].

В работах [22–26] рассмотрены повышение надежности путем различных способов резервирования элементов конструкции РТУ. Разнообразные способы резервирования предусматривают дублирование РТУ полностью либо отдельных его модулей [20–25].

Авторами сделан вывод о том, что даже при низкой вероятности безотказной работы отдельных элементов (0,5 и менее) РТУ можно получить сколь угодно высокую надежность системы в целом за счет различных способов резервирования [24–26].

Структурные методы оценки надежности с использованием резервирования требуют дополнительного усовершенствования и уточнения, связанного с влиянием надежности дополнительных переключателей, необходимых в этом случае, при различных способах резервирования [20–26].

Использование разнообразных способов резервирования требует дополнительных затрат, стоимость которых зависит от типа устройства, способа резервирования и т.п. Значительный интерес представляет разработка методов структурного резервирования с учетом оценки экономической эффективности.

Методы оценки влияния факторов окружающей среды на надежность РТУ.

Одним из важных факторов, имеющих существенное влияние на надежность радиотехнических устройств, являются климатические факторы (температура, окружающей среды, влажность, запыленность и др.) [5, 8, 19, 27–39].

Влияние факторов окружающей среды, в литературных источниках, как правило, выполняется путем многократного применения одного из изложенных выше методов (физических, структурных и др.) [3, 27]. Например, в работе [19], многократный расчет надежности РТУ позволил поучить аналитические зависимости рассматриваемых РТУ от температуры при заданной нагрузке, влажности и прочих неизменных параметрах. Однако, на практике, эксплуатация РТУ сопровождается изменением различных факторов окружающей среды нагрузки и т.д. и этот вопрос требует дальнейшего усовершенствования.

Особенностью оценки надежности в работе Иванова И.А., Королева П.С., Полесского С.Н. является разработка макромоделей РТУ в целом, без оценки надежности элементов их конструкции, однако на практике наличие всего 2 % дефектных компонентов более, чем в три раза снижает работоспособность аппаратуры и этот вопрос требует дальнейшего уточнения методов [19].

Эксплуатация РТУ может сопровождаться локальным увеличением их внутренней температуры, связанных с разнообразными причинами (некорректный расчет мощности рассеяния на этапе проектирования или эксплуатации [8, 33, 34, 39], старение изоляционных материалов [8], производственный брак [27], влияние климатических факторов [27] и т.д.). Разработка математических методов оценки безотказности РТУ, позволяющих прогнозировать и предотвращать подобные отказы требует дальнейшего изучения.

Для анализа температурных полей в элементах и блоках радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) до настоящего времени наиболее часто использовались модели с сосредоточенными параметрами или «нуль-мерные» [28]. При таком подходе существенно упрощаются процедуры анализа и расчета температурных полей благодаря положенному в основу моделирования базовому допущению о том, что как в малоразмерных ЭРИ, так и в достаточно крупных деталях аппаратуры отсутствуют градиенты температуры по всем координатным направлениям. Соответственно температурное поле любого ЭРИ или блока РЭА является однородным и характеризуется некоторой средней температурой, которая зависит только от времени. Поэтому в этом случае достаточно реально может быть отражено тепловое состояние лишь узлов радиоэлектронной аппаратуры, в которых неравномерность температурного поля невелика – порядка единиц градусов [28]. В других случаях обычно остается открытым вопрос о погрешности такой интерпретации реальных температурных полей [28].

Выводы. Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что:

1. В результате роста сложности структуры современных РТУ требуется совершенствования методов оценки их надежности.

2. Уточнение методов оценки безотказности РТУ необходимо, как на этапе проектирования, так и в процессе их эксплуатации.

3. Обозначены основные направления усовершенствования моделей надежности радиотехнических устройств.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Воздействие внешних условий на работоспособность радиоэлектронных средств (РЭС) / Д. В. Столбинский, П. П. Бем, В. А. Андреев, Д. В. Матвеев // Научные исследования Земли. – 2023. – Т. 15. – № 2. – С. 18–22.
2. Столбинский, Д. В. Методы обеспечения надежности радиоэлектронных устройств / Д. В. Столбинский, П. П. Бем, В. А. Андреев // Научные исследования Земли. – 2022. – Т. 14. – № 6. – С. 35–39.
3. Боровиков, С. М. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств / С. М. Боровиков, И. Н. Цырельчук, Ф. Д. Троян. – Минск: БГУИР, 2010. – 68 с.
4. ГОСТР 27.303- 2021 (МЭК 60812:2018) Надежность в технике Анализ видов и последствий отказов [Электронный ресурс]. – URL: <https://meganorm.ru/Data/758/75897.pdf> (дата обращения 01.07.2025).
5. Гойденко, В. К. Методика теплового контроля и диагностирования современных программно-аппаратных комплексов связи / В. К. Гойденко // Техника средств связи. – №1(145). –2019. – С.95–100.
6. Application of Kohonen's Algorithm in Electrical Diagnostics of Analog Circuits of Radioelectronic Devices / V. T. Nguyen, V. V. Chernoverskaya, D. A. Quan [et al.] // 2022 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT) (Moscow, 09-11 June). – 2022. – DOI: 10.1109/MWENT55238.2022.9802380.
7. Миронов, Ю. К. О создании отраслевого технического центра по электрорадиоизделиям в ФНПЦ ФГУП ПО «Старт» / Ю. К. Миронов // Новые промышленные технологии. – 2008. – № 3. – С. 23-25.
8. Максаков, С. А. Методика оценки воздействия факторов внешней среды на показатели надёжности радиоэлектронных устройств на этапе проектирования / С. А. Максаков, А. Н. Симаков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 83-90. – EDN YMPLEK.
9. Кочкин, Н. Ф. Обзор основных методик оценки надежности / Н. Ф. Кочкин, И. О. Завелинский, И. Л. Лушпа // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2016. – Т. 1. – С. 116-118. – EDN WHDNNL.
10. ГОСТ 27.301–95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. – Введ. 1997-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1996. – 16 с.
11. Анализ методов оценки надежности оборудования и систем. Практика применения методов / Е. М. Лаврищева, Н. В. Пакулин, А. Г. Рыжов, С. В. Зеленев // Труды ИСП РАН. – Т. 30. – Вып. 3. – 2018. – С. 99–120.
12. Строгонов, А. В. Характеристики надежности современных ПЛИС / А. В. Строгонов // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2019. – № 4. – С. 52–58.
13. Строгонов, А. В. Оценка долговечности БИС по результатам ускоренных испытаний / А. В. Строгонов // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 3(15). – С. 90-96. – EDN MUDIVP.
14. Строгонов, А. В. Расчет количественных показателей надежности цифровых БИС с использованием справочника MIL-HDBK-217F и программы MTBF Calculator фирмы ALD / А. Строгонов, С. А. Цыбин, П. С. Городков // Компоненты и технологии. – 2015. – № 1(162). – С. 104-110. – EDN THVGNN.
15. Строгонов, А. В. Расчет эксплуатационной интенсивности отказов у потребителя с помощью справочников MIL-HDBK-217F и АСРН2004 на примере ПЛИС / А. В. Строгонов // Компоненты и технологии. – 2018. – № 9(206). – С. 132-135. – EDN VMLAIQ.
16. Королев, П. С. Комплексный метод оценки показателей безотказности радиотехнических устройств космической аппаратуры / П. С. Королев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2021. – Т. 64. – № 4. – С. 316–328.

17. Королев, П. С. Оценка «коэффициента качества производства» для модели интенсивности отказов радиотехнических приборов непилотируемых автоматических космических аппаратов / П. С. Королев, В. В. Жаднов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – Т. 63. – № 3. – С. 264–277.
18. Жаднов, В. В. Сравнительный анализ методов оценки надежности полупроводниковых интегральных микросхем / В. В. Жаднов // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2013. – № 16. – С. 132-137. – EDN RPDEFPP.
19. Иванов, И. А. Разработка макромоделей прогнозирования надежности функциональных узлов с учетом влияния температуры окружающей среды / И. А. Иванов, П. С. Королев, С. Н. Полесский // Системный администратор. – 2016. – № 11(168). – С. 80-85. – EDN WXKKVN.
20. Thermal computer modeling of laser gyros at the design stage: a promising way to improve their quality and increase the economic efficiency of their development and production / E. Kuznetsov, Y. Golyaev, Y. Kolbas [et al.] // Optical and Quantum Electronics Switzerland: Springer, 2021. – V. 53, №. 10. – Art. number 596. – P. 1–15. – DOI: 10.1007/s11082-021-03253-8
21. ГОСТ Р 51901. 14–2005 (МЭК 61078:1991). Менеджмент риска. Метод структурной схемы надежности [Электронный ресурс]. – URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/13c/4293853349.pdf> (дата обращения 01.07.2025).
22. Давронбеков, Д. А. Методы оценки надежности цифровых элементов радиотехнических систем (монография) / Д. А. Давронбеков. – Т.: ТАТУ, 2017. – 168 с.
23. Тихменев, А. Н. Модели и методика для анализа надежности отказоустойчивой бортовой радиоэлектронной аппаратуры / А. Н. Тихменев // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского. – 2013. – № 1. – С. 410-414. – EDN UINQGL.
24. Повышение надежности электронных элементов на основе объемного резервирования / В. А. Смагин, В. П. Бубнов, А. В. Забродин, Д. В. Бараусов // Информация и космос. – 2023. – № 1. – С. 56-66. – EDN TXZANC.
25. Михайлов, В. С. Интегральные оценки в теории надёжности. Введение и основные результаты / В. С. Михайлов, Н. К. Юрков. – Москва: Техносфера, 2020. – 152 с.
26. Гельфман, Т. Э. Построение математических моделей прогнозирования и оптимизации показателей надёжности радиоэлектронных систем методами регрессионного анализа / Т. Э. Гельфман, А. П. Пирхавка, М. С. Цаплин // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем ("Радиоинфоком-2023"): Сборник научных статей по материалам VII Международной научно-практической конференции (Москва, 20–24 ноября 2023 г.). – Москва: МИРЭА-Российский технологический университет, 2023. – С. 25-29. – EDN QCIYUP.
27. Шелехова, О. Г. Оценка влияния температуры окружающей среды на показатели надёжности детектора банкнот / О. Г. Шелехова, В. Р. Кущенко, Д. В. Попадин // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2019. – № 1. – С. 17-23. – EDN VOBVLX.
28. Никольский, Ю. В. Прогнозирование надежности радиоэлектронных устройств на основе теплофизического моделирования / Ю. В. Никольский // Новые исследования в разработке техники и технологий. – 2015. – № 2. – С. 23-31. – EDN UYJQBT.
29. Храмцов, М. В. Устройства подогрева электронной компонентной базы радиоэлектронной аппаратуры в условиях отрицательных температур / М. В. Храмцов, А. М. Заболоцкий // Доклады ТУСУР. – 2022. – Т. 25. – № 3 – С.28–36.
30. Сучков, К. И. Развитие системных мероприятий управления качеством и надежностью электронной компонентной базы по направлениям сбора, обработки и анализа информации с этапов производства, применения и эксплуатации / К. И. Сучков, А. А. Невский, Ю. В. Рубцов // Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения. – 2021. – № 1. – С. 4-7. – EDN NOVFIIF.
31. Шлома, С. В. Температурное поле печатной платы при учете основных значимых физических процессов / С. В. Шлома // Исследования по баллистике и смежным вопросам механики: Сб. статей / Под ред. И.Б. Богоряда. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. – С.94-95.
32. Чумаков, В. Н. Методы моделирования тепловых повреждений полупроводниковых приборов / В. Н. Чумаков // Радиоэлектроника и информатика. – 1999. – №2. – С. 31–37.
33. Сергеев, В. А. Способ измерения тепловых параметров полупроводниковых изделий в составе электронного модуля / В. А. Сергеев, Р. Г. Тарасов // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2020. – Т. 2. – С. 183-185. – EDN WDYNNF.
34. Алексеев, В. Ф. Моделирование тепловых полей электронных систем в среде ANSYS / В. Ф. Алексеев, Г. А. Пискун, Д. В. Лихачевский // Big Data and Advanced Analytics. – 2020. – № 6-3. – С. 282-286. – EDN VIMPYX.

35. Искусственная нейронная сеть в задаче диагностики дефектов конструкций печатных узлов электронных средств / С. У. Увайсов, В. В. Черноверская, С. М. Лышов, Л. К. Х. Фам, А. С. Увайсова // Научные технологии. – 2020. – Т. 21. – №10. – С.29–39.
36. Филиппов, Б. И. Расчёт надёжности аппаратуры гидроакустического канала связи / Б. И. Филиппов, Е. А. Малахова // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2015. – № 4(82). – С. 67-91. – DOI 10.17212/2307-6879-2015-4-67-91. – EDN VQWFYL.
37. Филиппов, Б. И. Расчет надёжности радиотехнических систем без восстановления / Б. И. Филиппов, Т. Б. Труш // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2016. – № 1(83). – С. 47-68. – DOI 10.17212/2307-6879-2016-1-47-68. – EDN WAFPJX.
38. Zhechev, Y. The analysis of shielding effectiveness of the enclosure of an emi-filter for a spacecraft power bus / Y. Zhechev, A. Zabolotsky // International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing. – 2021. – V. 15. – P. 470-475. – DOI 10.46300/9106.2021.15.51. – EDN AQXIMA.
39. Козин, И. А. Метод оценки надёжности интегрированных радиоэлектронных систем управления космическими аппаратами на стадии эксплуатации / И. А. Козин, А. В. Гришин // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2020. – Т. 12. – № 3. – С. 13–19.

Поступила в редакцию 03.07.2025 г., рекомендована к печати 28.07.2025 г.

ANALYSIS OF METHODS FOR ASSESSING THE RELIABILITY OF RADIO ENGINEERING DEVICES

SHelekhova O.G., CHernikova L.V., Belik T.V., Dolbeshchenkov V.V.

The analysis of methods for assessing the reliability of radio engineering devices is carried out. The growth of complexity of modern radio engineering devices requires clarification of methods for assessing their reliability. The main directions for improving reliability models are identified.

Keywords: reliability, failure rate, express method, time to failure, probability of failure-free operation, and radio engineering devices.

Шелехова Ольга Георгиевна

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: jenjaistorik@mail.ru

SHelekhova Olga Georgievna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

Черникова Лидия Вячеславовна

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры международной экономики и маркетинга ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: lida76@rambler.ru

CHernikova Lidiia Viacheslavovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of International Economics and Marketing of Donetsk National Technical University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

Белик Татьяна Владимировна

старший преподаватель кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: tblom@mail.ru

Belik Tatiana Vladimirovna

Senior Lecturer at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

Долбещенков Вячеслав Васильевич

старший преподаватель кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: wd707@mail.ru

Dolbeshchenkov Viacheslav Vasilevich

Senior Lecturer at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ КОДИРОВАНИЯ НА РАССТОЯНИЕ, ВРЕМЯ И СКОРОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ LORA

© 2025 *Наумов М.А., Карповский А.Ю., Курносков В.Г.*

В статье рассматривается влияние скорости кодирования на ключевые параметры передачи данных по беспроводной связи LoRa: расстояние, время и скорость. Проведён эксперимент с использованием модуля LoRa SX1278 и микроконтроллера STM32F103C8T6 при различных отношениях сигнал/шум и коэффициентах расширения спектра. Показано, что скорость кодирования передаваемого пакета влияет на расстояние, пройденное сигналом, время, затрачиваемое на передачу, и общую скорость передачи данных. Приведены данные о нескольких экспериментах, проведенных в различных условиях. Представлен всесторонний анализ экспериментальных данных, в котором обращается внимание на четкие закономерности и корреляции, наблюдаемые в ходе эксперимента. Проведена аппроксимация экспериментальных данных и построены соответствующие графики.

Ключевые слова: беспроводная связь, скорость кодирования, расстояние передачи, время передачи, скорость передачи, LoRa, аппроксимация, ошибка.

Введение. Организация радиуправления является классической задачей при проектировании систем управления подвижными машинами и механизмами. В горно-шахтном оборудовании, в том числе и при автоматизации очистных комбайнов (машин для выемки пластовых полезных ископаемых) подсистема радиуправления должна обеспечивать выполнение своих функций как в зоне видимости комбайна, а также за её пределами. [1-3] Увеличение дальности радиуправления является особо важным, и позволяет повысить безопасность ведения работ по выемке угольных масс путем минимизации присутствия человека в опасной зоне. Одним из решений на рынке радиосвязи выступает технология LoRa [4-13].

Целью работы является выведение функциональных зависимостей влияния скорости кодирования на ключевые параметры передачи данных по беспроводной связи LoRa: расстояние, время и скорость. В открытых источниках информации нет данных о вышеуказанных функциональных зависимостях, что подтверждает актуальность их вычисления. Проведение исследований, направленных на выявление оптимальных параметров настройки скорости кодирования для достижения максимальных характеристик передачи данных, позволяет значительно улучшить производительность систем автоматического управления и обеспечить стабильную работу техники в удаленных и труднодоступных местах. Таким образом, данное исследование способствует повышению качества и безопасности эксплуатации высокотехнологичного оборудования, снижает риски аварий и повышает экономическую эффективность при ведении различных работ с использованием радиуправления. В ходе проведения исследований был осуществлен эксперимент, по результатам которого будем проводить необходимый анализ для изучения влияния скорости кодирования на качество беспроводной связи LoRa. В таблице 1 приведены результаты работы модуля LoRa SX1278 [14, 15] в связке с микроконтроллером stm32f103c8t6 [16] при различных отношениях сигнал/шум и коэффициентах расширения спектра.

Эксперимент был проведен в условиях плотной городской застройки в центре города Донецка. Передатчик и приемник радиосигнала находились в зоне прямой видимости. В процессе проведения эксперимента не учитывались внешние помехи от других схожих источников радиосигнала. В идеальных полевых условиях результаты эксперимента могут отличаться от представленных.

Таблица 1. Результаты проведения экспериментов

Скорость кодирования	Расстояние, м	Время передачи, мс	Скорость, Байт/с	RSSI	Отношение сигнал/шум, dB
3	327	99	10,1	-114,24	6,89
4	327	99	10,1	-117,73	5,08
5	367	111	9,01	-116,86	2,24
6	409	124	8,07	-117,03	3,38
7	449	136	7,35	-114,3	3,12
8	489	148	6,76	-115,77	2,64
9	489	148	6,76	-113,68	1,8

На рисунке 1 приведен график зависимости расстояния передачи данных от скорости кодирования (а), график зависимости времени (в мс) передачи данных от скорости кодирования (б) и график скорости (в байт/с) передачи данных от скорости кодирования (в).

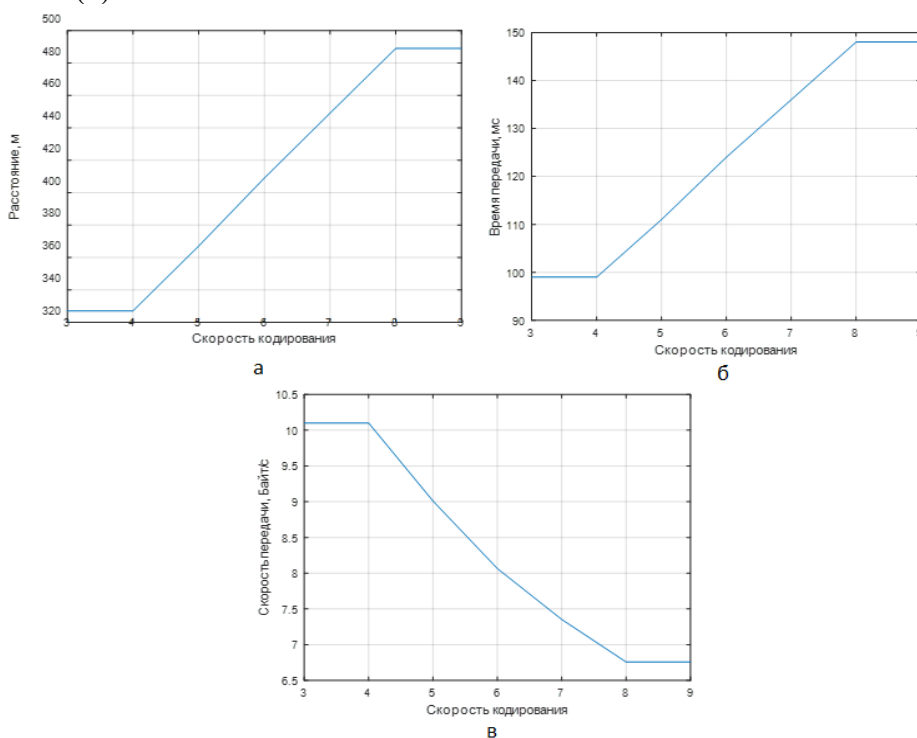


Рис. 1. График зависимости расстояния передачи данных (а), времени передачи данных (б) и скорости (в байт/с) передачи данных (в) от скорости кодирования

Графики, представленные на рисунке 1 построены по табличным экспериментальным значениям. В ходе исследования в открытых источниках информации не было найдено функциональных зависимостей, описывающих закон, по которым изменяются переменные расстояния, времени и скорости передачи данных по беспроводной связи LoRa. Для выведения функциональных зависимостей из табличных значений воспользуемся аппроксимацией [17-20].

Аппроксимация зависимости расстояния передачи данных от скорости кодирования. Аппроксимируем график, изображенный на рисунке 1 (а) с помощью линейной регрессии (1):

$$\hat{y} = a * x + b, \quad (1)$$

где x - скорость кодирования; \hat{y} – расстояние передачи данных.

Найдем коэффициент a по формуле (2):

$$a = \frac{\sum x_i * \sum y_i - n * \sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - n * \sum x_i^2} = \frac{42 * 2857 - 7 * 32765}{42^2 - 7 * 280} = 31,86, \quad (2)$$

где x - скорость кодирования; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

Найдем коэффициент b по формуле (3):

$$b = \frac{\sum x_i * \sum x_i y_i - \sum x_i^2 * \sum y_i}{(\sum x_i)^2 - n * \sum x_i^2} = \frac{42 * 18034 - 280 * 2857}{42^2 - 7 * 280} = 217, \quad (3)$$

где x - скорость кодирования; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

Тогда уравнение (1) линейной регрессии, описывающее зависимость скорости кодирования от расстояния передачи данных, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 31,86 * x + 217.$$

Среднюю ошибку аппроксимаций будем находить по формуле (4).

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| * 100\%, \quad (4)$$

где \hat{y} - аппроксимированное значение расстояния передачи данных; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

Аппроксимируем график, изображенный на рисунке 1а с помощью квадратичной регрессии. Уравнение квадратичной регрессии показано на формуле (5):

$$\hat{y} = a * x^2 + b * x + c, \quad (5)$$

где x - скорость кодирования; \hat{y} – расстояние передачи данных.

Найдем коэффициенты a , b и c с помощью системы уравнений:

$$\begin{cases} a * \sum x_i^2 + b * \sum x_i + n * c = \sum y_i \\ a * \sum x_i^3 + b * \sum x_i^2 + \sum x_i = \sum x_i y_i \\ a * \sum x_i^4 + b * \sum x_i^3 + \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i \end{cases} = \begin{cases} a * 280 + b * 42 + 7 * c = 2266 \\ a * 2016 + b * 280 + c * 42 = 18034 \\ a * 15316 + b * 2016 + c * 280 = 124980 \end{cases} = \begin{cases} a = -0,05 \\ b = 32,43 \\ c = 215,48 \end{cases}$$

где x - скорость кодирования; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

Тогда уравнение (5) квадратичной регрессии, описывающее зависимость скорости кодирования от расстояния передачи данных, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 0,05 * x^2 + 32,43 * x + 215,48.$$

Аппроксимируем график, изображенный на рисунке 1а с помощью кубической регрессии. Уравнение кубической регрессии показано на формуле (6):

$$\hat{y} = a * x^3 + b * x^2 + c * x + d, \quad (6)$$

где x - скорость кодирования; \hat{y} – расстояние передачи данных.

Найдем коэффициенты a , b , c и d с помощью системы уравнений:

$$\begin{cases} a * \sum x_i^3 + b * \sum x_i^2 + c * \sum x_i + n * d = \sum y_i \\ a * \sum x_i^4 + b * \sum x_i^3 + \sum x_i^2 + \sum x_i = \sum x_i y_i \\ a * \sum x_i^5 + b * \sum x_i^4 + \sum x_i^3 + \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i \\ a * \sum x_i^6 + b * \sum x_i^5 + \sum x_i^4 + \sum x_i^3 = \sum x_i^3 y_i \end{cases} = \begin{cases} a * 2016 + b * 280 + c * 42 + 7 * d = 2857 \\ a * 15316 + b * 2016 + c * 280 + d * 42 = 18034 \\ a * 120792 + b * 15316 + c * 2016 + d * 280 = 124980 \\ a * 978340 + b * 120792 + c * 15316 + d * 2016 = 924832 \end{cases} =$$

$$= \begin{cases} a = -2,28 \\ b = 40,95 \\ c = -197,63 \\ d = 611,81 \end{cases}$$

где x - скорость кодирования; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

Тогда уравнение (6) кубической регрессии, описывающее зависимость скорости кодирования от расстояния передачи данных, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = -2,28 * x^3 + 40,95 * x^2 - 197,63 * x + 611,81.$$

Аппроксимируем график, изображенный на рисунке 1а с помощью степенной регрессии. Уравнение степенной регрессии показано на формуле (7):

$$\hat{y} = a * x^b, \quad (7)$$

где x - скорость кодирования; y – расстояние передачи данных.

Найдем коэффициент b :

$$b = \frac{n * \sum (\ln(x_i) * \ln(y_i)) - \sum \ln(x_i) * \sum \ln(y_i)}{n * \sum \ln^2(x_i) - (\sum \ln(x_i))^2} = \frac{7 * 73,03 - 12,11 * 41,99}{7 * 146,65 - 146,65} = 191,23,$$

где x - скорость кодирования; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

Найдем коэффициент a :

$$a = \exp\left(\frac{1}{n} * \sum \ln(y_i) - \frac{b}{n} * \sum \ln(x_i)\right) = \exp\left(\frac{1}{7} * 41,99 - \frac{191,23}{7} * 12,11\right) = 0,43,$$

где x - скорость кодирования; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

Тогда уравнение (7) степенной регрессии, описывающее зависимость скорости кодирования от расстояния передачи данных, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 193,23 * x^{0,43}.$$

Аппроксимируем график, изображенный на рисунке 1а с помощью показательной регрессии. Уравнение показательной регрессии показано на формуле (8):

$$\hat{y} = a * b^x, \quad (8)$$

где x - скорость кодирования; \hat{y} – расстояние передачи данных.

Найдем коэффициент b :

$$b = \exp\left(\frac{n * \sum(x_i * \ln(y_i)) - \sum x_i * \sum \ln(y_i)}{n * \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}\right) = \exp\left(\frac{7 * 154,16 - 42 * 41,99}{7 * 280 - 1764}\right) = 1,08,$$

где x - скорость кодирования; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

Найдем коэффициент a :

$$a = \exp\left(\frac{1}{n} * \sum \ln(y_i) - \frac{\ln(b)}{n} * \sum x_i\right) = \exp\left(\frac{1}{7} * 41,99 - \frac{0,08}{7} * 42\right) = 245,72,$$

где x - скорость кодирования; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

Тогда уравнение (8) показательной регрессии, описывающее зависимость скорости кодирования от расстояния передачи данных, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 250,72 * 1,08^x.$$

Аппроксимируем график, изображенный на рисунке 1а с помощью гиперболической регрессии. Уравнение гиперболической регрессии показано на формуле (9):

$$\hat{y} = a + \frac{b}{x}, \quad (9)$$

где x - скорость кодирования; \hat{y} – расстояние передачи данных.

Найдем коэффициент b по формуле (10):

$$b = \frac{n * \sum \frac{y_i}{x_i} - \sum \frac{1}{x_i} * \sum y_i}{n * \sum \frac{1}{x_i^2} - (\sum \frac{1}{x_i})^2} = \frac{7 * 511,92 - 1,33 * 2857}{7 * 0,29 - 1,77} = -813,97. \quad (10)$$

где x - скорость кодирования; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

Найдем коэффициент a по формуле (11).

$$a = \frac{1}{n} * \sum y_i - \frac{b}{n} * \sum \frac{1}{x_i} = \frac{1}{7} * 2857 + \frac{813,97}{7} * 1,33 = 562,68, \quad (11)$$

где x - скорость кодирования; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

Тогда уравнение (9) гиперболической регрессии, описывающее зависимость скорости кодирования от расстояния передачи данных, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 562,68 - \frac{813,97}{x},$$

Аппроксимируем график, изображенный на рисунке 1а с помощью логарифмической регрессии. Уравнение логарифмической регрессии показано на формуле (12):

$$\hat{y} = a + b * \ln(x), \quad (12)$$

где x - скорость кодирования; \hat{y} – расстояние передачи данных.

Найдем коэффициент b :

$$b = \frac{n * \sum(y_i * \ln(x_i)) - \sum \ln(x_i) * \sum y_i}{n * \sum \ln^2(x_i) - (\sum \ln(x_i))^2} = \frac{7 * 5101,1 - 12,11 * 2857}{7 * 146,65 - 146,65} = 172,41,$$

где x - скорость кодирования; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

Найдем коэффициент a по формуле (13):

$$a = \frac{1}{n} * \sum y_i - \frac{b}{n} * \sum \ln(x_i) = \frac{1}{7} * 2857 + \frac{172,41}{7} * 12,11 = 109,91, \quad (13)$$

где x - скорость кодирования; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

Тогда уравнение (12) логарифмической регрессии, описывающее зависимость скорости кодирования от расстояния передачи данных, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 109,91 + 172,41 * \ln(x).$$

Аппроксимируем график, изображенный на рисунке 1а с помощью экспоненциальной регрессии. Уравнение экспоненциальной регрессии показано на формуле (14):

$$\hat{y} = e^{a+b*x}, \quad (14)$$

где x - скорость кодирования; \hat{y} – расстояние передачи данных.

Найдем коэффициент b по формуле (15):

$$b = \frac{n * \sum(x_i * \ln(y_i)) - \sum \ln(y_i) * \sum x_i}{n * \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{7 * 254,16 - 41,99 * 42}{7 * 280 - 1764} = 0,08, \quad (15)$$

где x - скорость кодирования; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

Найдем коэффициент a по формуле (16):

$$a = \frac{1}{n} * \sum \ln(y_i) - \frac{b}{n} * \sum x_i = \frac{1}{7} * 41,99 - \frac{0,08}{7} * 42 = 6 - 0,48 = 5,52, \quad (16)$$

где x - скорость кодирования; y – расстояние передачи данных; n – количество проведенных опытов.

Тогда уравнение экспоненциальной регрессии, описывающее зависимость расстояния передачи данных от скорости кодирования, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = e^{5,52+0,08*x}.$$

В таблице 2 приведены средние ошибки аппроксимаций в процентном соотношении. На рисунке 2 приведены график исходной функции и функциональных зависимостей, полученных различными методами аппроксимации.

Таблица 2. Средняя ошибка различных методов аппроксимации

Метод аппроксимации	Средняя ошибка, %
Линейная регрессия	3
Квадратичная регрессия	3
Кубическая регрессия	0,68
Степенная регрессия	3,47
Показательная регрессия	3,11
Гиперболическая регрессия	6,27
Логарифмическая регрессия	4,03
Экспоненциальная регрессия	3,11

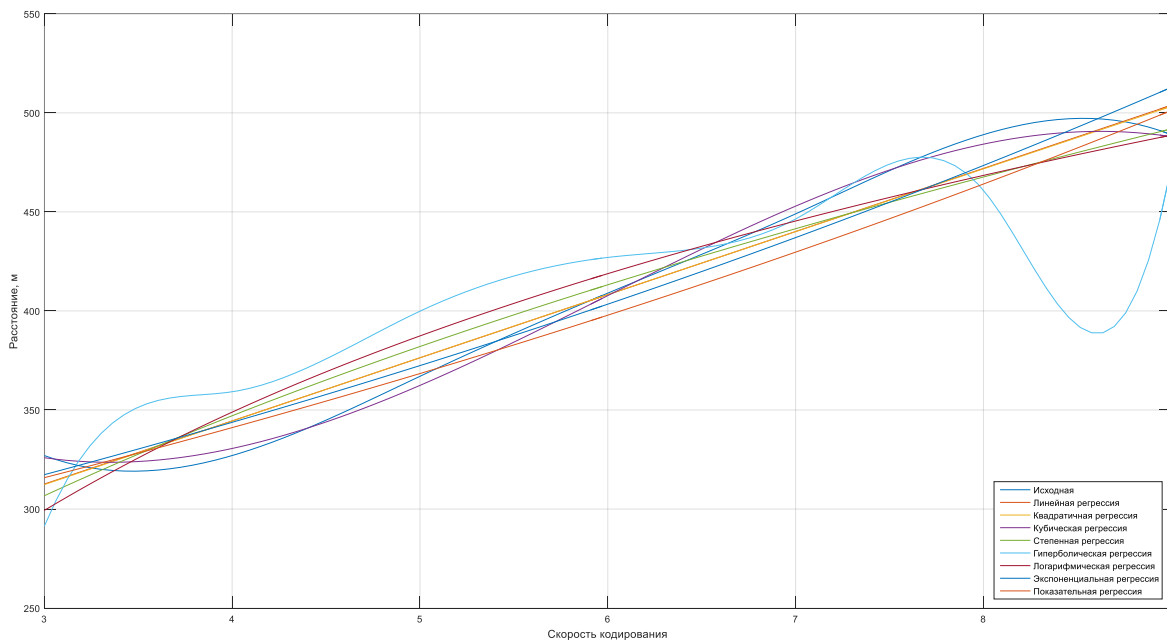


Рис. 2. График табличных экспериментальных значений и графики аппроксимированных функций

Аппроксимация зависимости времени передачи данных от скорости кодирования. Аппроксимируем график, изображенный на рисунке 1б с помощью линейной регрессии. Уравнение линейной регрессии показано на формуле (1).

Найдем коэффициент а по формуле (2):

$$a = \frac{\sum x_i * \sum y_i - n * \sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - n * \sum x_i^2} = \frac{42 * 865 - 7 * 5460}{42^2 - 7 * 280} = 9,64.$$

Найдем коэффициент b по формуле (3):

$$b = \frac{\sum x_i * \sum x_i y_i - \sum x_i^2 * \sum y_i}{(\sum x_i)^2 - n * \sum x_i^2} = \frac{42 * 5460 - 280 * 865}{42^2 - 7 * 280} = 65,71.$$

Тогда уравнение (1) линейной регрессии, описывающее зависимость времени передачи данных от скорости кодирования, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 9,64 * x + 65,71.$$

Аппроксимируем график, изображенный на рисунке 1б с помощью квадратичной регрессии. Уравнение кубической регрессии показано на формуле (5).

Найдем коэффициенты а, в и с с помощью системы уравнений:

$$\begin{cases} a * \sum x_i^2 + b * \sum x_i + n * c = \sum y_i \\ a * \sum x_i^3 + b * \sum x_i^2 + \sum x_i = \sum x_i y_i \\ a * \sum x_i^4 + b * \sum x_i^3 + \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i \end{cases} = \begin{cases} a * 280 + b * 42 + 7 * c = 865 \\ a * 2016 + b * 280 + c * 42 = 5460 \\ a * 15316 + b * 2016 + c * 280 = 37838 \end{cases} = \begin{cases} a = -0,02 \\ b = 9,93 \\ c = 64,95 \end{cases}.$$

Тогда уравнение (5) квадратичной регрессии, описывающее зависимость времени передачи данных от скорости кодирования, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = -0,02 * x^2 + 9,93 * x + 64,95.$$

Аппроксимируем график, изображенный на рисунке 1б с помощью кубической регрессии. Уравнение кубической регрессии показано на формуле (6).

Найдем коэффициенты а, в, с и d с помощью системы уравнений:

$$\begin{cases} a * \sum x_i^3 + b * \sum x_i^2 + c * \sum x_i + n * d = \sum y_i \\ a * \sum x_i^4 + b * \sum x_i^3 + \sum x_i^2 + \sum x_i = \sum x_i y_i \\ a * \sum x_i^5 + b * \sum x_i^4 + \sum x_i^3 + \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i \\ a * \sum x_i^6 + b * \sum x_i^5 + \sum x_i^4 + \sum x_i^3 = \sum x_i^3 y_i \end{cases} = \begin{cases} a * 2016 + b * 280 + c * 42 + 7 * d = 865 \\ a * 15316 + b * 2016 + c * 280 + d * 42 = 5460 \\ a * 120792 + b * 15316 + c * 2016 + d * 280 = 37838 \\ a * 978340 + b * 120792 + c * 15316 + d * 2016 = 279984 \end{cases} = \begin{cases} a = -0,69 \\ b = 12,48 \\ c = -60,21 \\ d = 185,79 \end{cases}.$$

Тогда уравнение (6) кубической регрессии, описывающее зависимость времени передачи данных от скорости кодирования, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = -0,69 * x^3 + 12,48 * x^2 - 60,21 * x + 185,79.$$

Аппроксимируем график, изображенный на рисунке 1б с помощью степенной регрессии. Уравнение степенной регрессии показано на формуле (8).

Найдем коэффициент b:

$$b = \frac{n * \sum (\ln(x_i) * \ln(y_i)) - \sum \ln(x_i) * \sum \ln(y_i)}{n * \sum \ln^2(x_i) - (\sum \ln(x_i))^2} = \frac{7 * 58,87 - 12,11 * 33,63}{7 * 146,65 - 146,65} = 0,43.$$

Найдем коэффициент а:

$$a = \exp\left(\frac{1}{n} * \sum \ln(y_i) - \frac{b}{n} * \sum \ln(x_i)\right) = \exp\left(\frac{1}{7} * 33,63 - \frac{0,43}{7} * 12,11\right) = 57,89.$$

Тогда уравнение (7) степенной регрессии, описывающее зависимость времени передачи данных от скорости кодирования, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 57,89 * x^{0,43}.$$

Аппроксимируем график, изображенный на рисунке 1б с помощью показательной регрессии. Уравнение показательной регрессии показано на формуле (8).

Найдем коэффициент b:

$$b = \exp\left(\frac{n * \sum(x_i * \ln(y_i)) - \sum x_i * \sum \ln(y_i)}{n * \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}\right) = \exp\left(\frac{7 * 203,98 - 42 * 33,63}{7 * 280 - 1764}\right) = 1,08.$$

Найдем коэффициент a:

$$a = \exp\left(\frac{1}{n} * \sum \ln(y_i) - \frac{\ln(b)}{n} * \sum x_i\right) = \exp\left(\frac{1}{7} * 33,63 - \frac{0,08}{7} * 42\right) = 75,91.$$

Тогда уравнение (8) показательной регрессии, описывающее зависимость времени передачи данных от скорости кодирования, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 75,91 * 1,08^x.$$

Аппроксимируем график, изображенный на рисунке 1б с помощью гиперболической регрессии. Уравнение гиперболической регрессии показано на формуле (9).

Найдем коэффициент b по формуле (10):

$$b = \frac{n * \sum \frac{y_i}{x_i} - \sum \frac{1}{x_i} * \sum y_i}{n * \sum \frac{1}{x_i^2} - (\sum \frac{1}{x_i})^2} = \frac{7 * 154,99 - 1,33 * 865}{7 * 0,29 - 1,77} = -246,47.$$

Найдем коэффициент a по формуле (11):

$$a = \frac{1}{n} * \sum y_i - \frac{b}{n} * \sum \frac{1}{x_i} = \frac{1}{7} * 865 + \frac{246,47}{7} * 1,33 = 170,37.$$

Тогда уравнение (9) гиперболической регрессии, описывающее зависимость времени передачи данных от скорости кодирования, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 170,37 - \frac{246,47}{x}.$$

Аппроксимируем график, изображенный на рисунке 1б с помощью логарифмической регрессии. Уравнение логарифмической регрессии показано на формуле (12).

Найдем коэффициент b:

$$b = \frac{n * \sum(y_i * \ln(x_i)) - \sum \ln(x_i) * \sum y_i}{n * \sum \ln^2(x_i) - (\sum \ln(x_i))^2} = \frac{7 * 1544,4 - 12,11 * 865}{7 * 146,65 - 146,65} = 52,2.$$

Найдем коэффициент а по формуле (13):

$$a = \frac{1}{n} * \sum y_i - \frac{b}{n} * \sum \ln(x_i) = \frac{1}{7} * 865 - \frac{52,2}{7} * 12,11 = 33,28.$$

Тогда уравнение (12) логарифмической регрессии, описывающее зависимость времени передачи данных от скорости кодирования, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 33,28 + 52,2 * \ln(x).$$

Аппроксимируем график, изображенный на рисунке 1б с помощью экспоненциальной регрессии. Уравнение экспоненциальной регрессии показано на формуле (14).

Найдем коэффициент b по формуле (15):

$$b = \frac{n * \sum(x_i * \ln(y_i)) - \sum \ln(y_i) * \sum x_i}{n * \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{7 * 203,98 - 33,63 * 42}{7 * 280 - 1764} = 0,08.$$

Найдем коэффициент а по формуле (16):

$$a = \frac{1}{n} * \sum \ln(y_i) - \frac{b}{n} * \sum x_i = \frac{1}{7} * 33,63 - \frac{0,08}{7} * 42 = 4,33.$$

Тогда уравнение (14) экспоненциальной регрессии, описывающее зависимость времени передачи данных от скорости кодирования, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = e^{4,33+0,08*x}.$$

В таблице 3 приведены средние ошибки аппроксимаций в процентном соотношении. На рисунке 3 приведены график исходной функции и функциональных зависимостей, полученных различными методами аппроксимации.

Таблица 3. Средняя ошибка различных методов аппроксимации

Метод аппроксимации	Средняя ошибка, %
Линейная регрессия	3,04
Квадратичная регрессия	3,04
Кубическая регрессия	0,66
Степенная регрессия	3,47
Показательная регрессия	3,15
Гиперболическая регрессия	6,26
Логарифмическая регрессия	4,02
Экспоненциальная регрессия	3,15

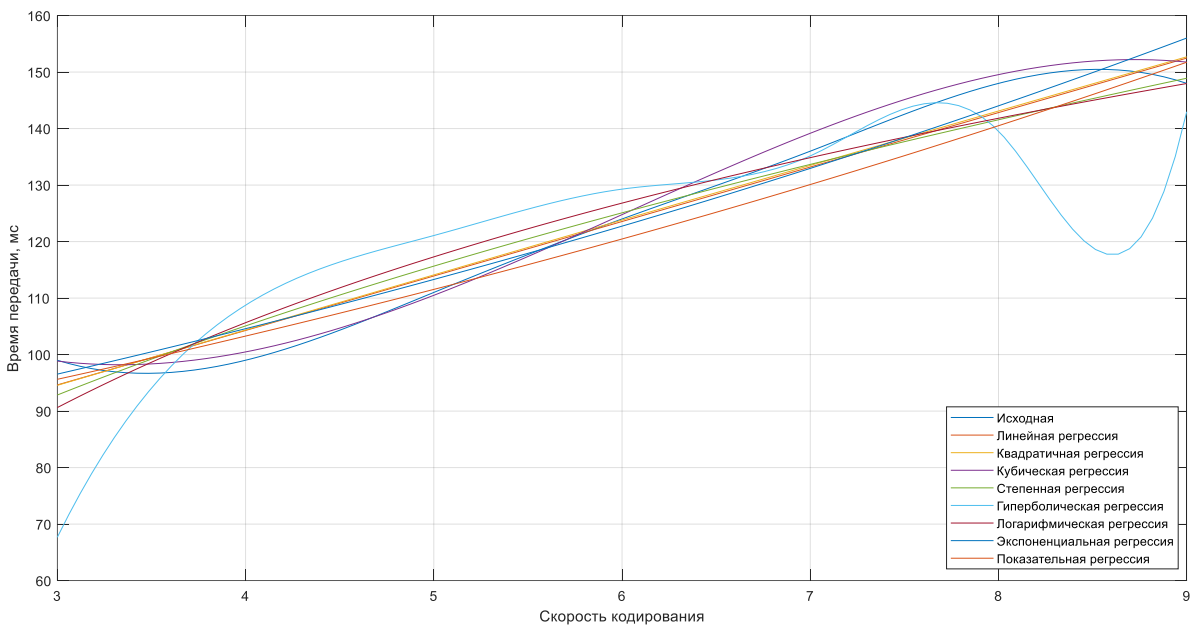


Рис. 3. График табличных экспериментальных значений и графики аппроксимированных функций

Аппроксимация зависимости скорости передачи данных от скорости кодирования. Аппроксимируем график, изображенный на рисунке 1в с помощью линейной регрессии. Уравнение линейной регрессии показано на формуле (1).

Найдем коэффициент a по формуле (2):

$$a = \frac{\sum x_i * \sum y_i - n * \sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - n * \sum x_i^2} = \frac{42 * 58,14 - 7 * 330,48}{42^2 - 7 * 280} = -0,66.$$

Найдем коэффициент b по формуле (3):

$$b = \frac{\sum x_i * \sum x_i y_i - \sum x_i^2 * \sum y_i}{(\sum x_i)^2 - n * \sum x_i^2} = \frac{42 * 330,48 - 280 * 58,14}{42^2 - 7 * 280} = 12,24.$$

Тогда уравнение (1) линейной регрессии, описывающее зависимость скорости передачи данных от скорости кодирования, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = -0,66 * x + 12,24.$$

Аппроксимируем график, изображенный на рисунке 1в с помощью квадратичной регрессии. Уравнение квадратичной регрессии показано на формуле (5).

Найдем коэффициенты a , b и c с помощью системы уравнений:

$$\begin{cases} a * \sum x_i^2 + b * \sum x_i + n * c = \sum y_i \\ a * \sum x_i^3 + b * \sum x_i^2 + \sum x_i = \sum x_i y_i \\ a * \sum x_i^4 + b * \sum x_i^3 + \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i \end{cases} = \begin{cases} a * 280 + b * 42 + 7 * c = 58,14 \\ a * 2016 + b * 280 + c * 42 = 330,18 \\ a * 15316 + b * 2016 + c * 280 = 2108,1 \end{cases} = \begin{cases} a = 0,04 \\ b = -1,08 \\ c = 13,37 \end{cases}$$

Тогда уравнение (5) квадратичной регрессии, описывающее зависимость скорости передачи данных от скорости кодирования, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 0,04 * x^2 - 1,08 * x + 13,37.$$

Аппроксимируем график, изображенный на рисунке 1в с помощью кубической регрессии. Уравнение кубической регрессии показано на формуле (6).

Найдем коэффициенты а, b, с и d с помощью системы уравнений:

$$\begin{cases} a * \sum x_i^3 + b * \sum x_i^2 + c * \sum x_i + n * d = \sum y_i \\ a * \sum x_i^4 + b * \sum x_i^3 + c * \sum x_i^2 + d * \sum x_i = \sum x_i y_i \\ a * \sum x_i^5 + b * \sum x_i^4 + c * \sum x_i^3 + d * \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i \\ a * \sum x_i^6 + b * \sum x_i^5 + c * \sum x_i^4 + d * \sum x_i^3 = \sum x_i^3 y_i \end{cases} = \begin{cases} a * 2016 + b * 280 + c * 42 + 7 * d = 58,14 \\ a * 15316 + b * 2016 + c * 280 + d * 42 = 330,48 \\ a * 120792 + b * 15316 + c * 2016 + d * 280 = 2108,1 \\ a * 978340 + b * 120792 + c * 15316 + d * 2016 = 14694 \end{cases}$$

$$= \begin{cases} a = 0,05 \\ b = -0,79 \\ c = 3,57 \\ d = 5,36 \end{cases}$$

Тогда уравнение (6) кубической регрессии, описывающее зависимость скорости передачи данных от скорости кодирования, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 0,05 * x^3 - 0,79 * x^2 + 3,57 * x + 5,36.$$

Аппроксимируем график, изображенный на рисунке 1в с помощью степенной регрессии. Уравнение степенной регрессии показано на формуле (7):

Найдем коэффициент b:

$$b = \frac{n * \sum (\ln(x_i) * \ln(y_i)) - \sum \ln(x_i) * \sum \ln(y_i)}{n * \sum \ln^2(x_i) - (\sum \ln(x_i))^2} = \frac{7 * 25,08 - 12,11 * 14,73}{7 * 146,65 - 146,65} = -0,43.$$

Найдем коэффициент а:

$$a = \exp\left(\frac{1}{n} * \sum \ln(y_i) - \frac{b}{n} * \sum \ln(x_i)\right) = \exp\left(\frac{1}{7} * 14,73 + \frac{0,43}{7} * 12,11\right) = 17,27.$$

Тогда уравнение (7) степенной регрессии, описывающее зависимость времени передачи данных от скорости кодирования, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 17,27 * x^{-0,43}.$$

Аппроксимируем график, изображенный на рисунке 1в с помощью показательной регрессии. Уравнение показательной регрессии показано на формуле (8).

Найдем коэффициент b:

$$b = \exp\left(\frac{n * \sum (x_i * \ln(y_i)) - \sum x_i * \sum \ln(y_i)}{n * \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}\right) = \exp\left(\frac{7 * 86,15 - 42 * 14,73}{7 * 280 - 1764}\right) = 0,92.$$

Найдем коэффициент а:

$$a = \exp\left(\frac{1}{n} * \sum \ln(y_i) - \frac{\ln(b)}{n} * \sum x_i\right) = \exp\left(\frac{1}{7} * 14,73 + \frac{0,08}{7} * 42\right) = 13,17.$$

Тогда уравнение (8) показательной регрессии, описывающее зависимость скорости передачи данных от скорости кодирования, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 13,17 * 0,92^x.$$

Аппроксимируем график, изображенный на рисунке 1в с помощью гиперболической регрессии. Уравнение гиперболической регрессии показано на формуле (9).

Найдем коэффициент b по формуле (10):

$$b = \frac{n * \sum \frac{y_i}{x_i} - \sum \frac{1}{x_i} * \sum y_i}{n * \sum \frac{1}{x_i^2} - (\sum \frac{1}{x_i})^2} = \frac{7 * 11,68 - 1,33 * 58,14}{7 * 0,29 - 1,77} = 17,23.$$

Найдем коэффициент a по формуле (11):

$$a = \frac{1}{n} * \sum y_i - \frac{b}{n} * \sum \frac{1}{x_i} = \sum \frac{1}{x_i} = \frac{1}{7} * 58,14 - \frac{17,23}{7} * 1,33 = 5,04.$$

Тогда уравнение (9) гиперболической регрессии, описывающее зависимость скорости передачи данных от скорости кодирования, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 5,04 + \frac{17,23}{x}.$$

Аппроксимируем график, изображенный на рисунке 1в с помощью логарифмической регрессии. Уравнение логарифмической регрессии показано на формуле (12).

Найдем коэффициент b :

$$b = \frac{n * \sum (y_i * \ln(x_i)) - \sum \ln(x_i) * \sum y_i}{n * \sum \ln^2(x_i) - (\sum \ln(x_i))^2} = \frac{7 * 97,25 - 12,11 * 58,14}{7 * 146,65 - 146,65} = -3,6.$$

Найдем коэффициент a по формуле (13):

$$a = \frac{1}{n} * \sum y_i - \frac{b}{n} * \sum \ln(x_i) = \frac{1}{7} * 58,14 + \frac{3,6}{7} * 12,11 = 14,54.$$

Тогда уравнение (12) логарифмической регрессии, описывающее зависимость времени передачи данных от скорости кодирования, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 14,54 - 3,6 * \ln(x).$$

Аппроксимируем график, изображенный на рисунке 1в с помощью экспоненциальной регрессии. Уравнение экспоненциальной регрессии показано на формуле (14).

Найдем коэффициент b по формуле (15):

$$b = \frac{n * \sum(x_i * \ln(y_i)) - \sum \ln(y_i) * \sum x_i}{n * \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{7 * 86,15 - 14,73 * 42}{7 * 280 - 1764} = -0,08.$$

Найдем коэффициент а по формуле (16):

$$a = \frac{1}{n} * \sum \ln(y_i) - \frac{b}{n} * \sum x_i = \frac{1}{7} * 14,73 + \frac{0,08}{7} * 42 = 2,58.$$

Тогда уравнение (14) экспоненциальной регрессии, описывающее зависимость скорости передачи данных от скорости кодирования, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = e^{2,58-0,08*x}.$$

В таблице 4 приведены средние ошибки аппроксимаций в процентном соотношении. На рисунке 4 приведены график исходной функции и функциональных зависимостей, полученных различными методами аппроксимации.

Таблица 4. Средняя ошибка различных методов аппроксимации

Метод аппроксимации	Средняя ошибка, %
Линейная регрессия	3,39
Квадратичная регрессия	2,99
Кубическая регрессия	1,09
Степенная регрессия	3,48
Показательная регрессия	3,13
Гиперболическая регрессия	4,75
Логарифмическая регрессия	3,16
Экспоненциальная регрессия	3,13

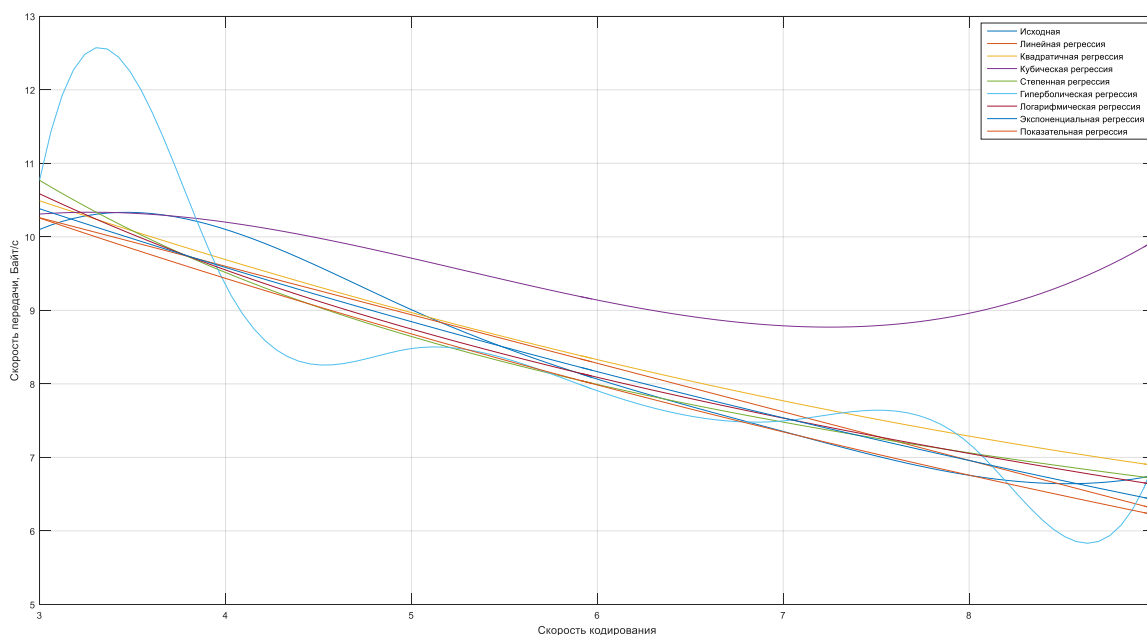


Рис. 4. График табличных экспериментальных значений и графики аппроксимированных функций

Выводы. Наиболее точным методом аппроксимации зависимости расстояния от скорости кодирования является кубическая регрессия. Не рекомендуется использовать гиперболическую регрессию для аппроксимации зависимости расстояния передачи данных от скорости кодирования, так как этот метод аппроксимации имеет значительную высокую среднюю ошибку. Наиболее точным методом аппроксимации зависимости времени передачи данных от скорости кодирования является кубическая регрессия. Не рекомендуется использовать гиперболическую регрессию для аппроксимации зависимости времени передачи данных от скорости кодирования, так как этот метод аппроксимации имеет значительную высокую среднюю ошибку. Наиболее точным методом аппроксимации зависимости скорости передачи данных от скорости кодирования является кубическая регрессия. Не рекомендуется использовать гиперболическую регрессию для аппроксимации зависимости времени передачи данных от скорости кодирования, так как этот метод аппроксимации имеет значительную высокую среднюю ошибку.

В ходе проведения исследований были выявлены зависимости между скоростью кодирования и расстоянием передачи данных, временем передачи посылки, а также скоростью передачи. Получены функциональные описания этих зависимостей различными методами аппроксимации экспериментальных данных, вычислены ошибки регрессии в процентном соотношении. Выделены наиболее точные методы аппроксимации данных, полученных в результате эксперимента.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Naumov, M. A. Development of a control system for machines and mechanisms using lora wireless communication technology / M. A. Naumov, A. Yu. Karpovsky // Сборник материалов научно-практической конференции для преподавателей гуманитарных дисциплин Young scientists' researches and achievements in science. – Донецк, 2024. – С. 281-289.
2. Наумов, М. А. Разработка и исследование стенда для проверки беспроводной радиосвязи LoRa / М. А. Наумов, А. Ю. Карповский // Материалы XIX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием Инженеры настоящего и будущего: практика и перспективы развития партнерства в высшем техническом образовании – Таганрог, 2024. – Т. 2. – С. 330-336.
3. Наумов, М. А. Разработка системы управления машина и механизмами с применением беспроводной технологии связи LoRa / М. А. Наумов, А. Ю. Карповский, В. В. Казаков // Сборник научных трудов XXIV Международной научно-технической конференции Автоматизация Технологических процессов. Поиск молодых. – Донецк, 2024. – С. 123-126.
4. LoRaWAN Specification. – URL: https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/2015_-_lorawan_specification_r0_611_1.pdf (дата обращения 01.11.2024).
5. Experimental Characterization of LoRaWAN Link Quality. – URL: <https://hal.science/hal-02316402/document> (дата обращения 01.11.2024).
6. Обзор технологии LoRa [Электронный ресурс]. – URL: <https://itechinfo.ru/node/46> (дата обращения 01.11.2024).
7. Применение технологии LoRa в беспилотных авиационных системах / М. А. Межетов, А. И. Тихова, У. С. Вахрушева, А. В. Федоров // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации: сборник трудов X Международной научно-практической конференции, Иркутск, 14–15 октября 2021 года. Том 2. – Иркутск: Иркутский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет гражданской авиации», 2021. – С. 180-185. – EDN UZUCLT.
8. A Multi-Channel Software Decoder for the LoRa Modulation Scheme / P. Robyns [et al.] // IoTBDS. – 2018. – P. 41-51.
9. Known and unknown facts of LoRa: Experiences from a large-scale measurement study / J. C. Liando [et al.] // ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN). – 2019. – V. 15. – №.2. – P. 1-35.
10. Complete reverse engineering of LoRa PHY [Электронный ресурс]. – URL: https://www.epfl.ch/labs/tcl/wp-content/uploads/2020/02/Reverse_Eng_Report.pdf (дата обращения 01.11.2024).

11. Scalability analysis of large-scale LoRaWAN networks in ns-3 / V. F. Abeele [et al.] // IEEE Internet of Things Journal. – 2017. – V. 4. – №. 6. – С. 2186-2198.
12. From Demodulation to Decoding: Toward Complete LoRa PHY Understanding and Implementation / Z. Xu [et al.] // ACM Transactions on Sensor Networks. – 2023. – V. 18. – №.4. – P. 1-27.
13. An open-source LoRa physical layer prototype on GNU radio / J. Tapparel [et al.] // 2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE, 2020. – P. 1-5.
14. IoT Communication Protocols—Network Protocols Ignacio de Mendizabal [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/internet-of-communication-communication-protocols-network-protocols/> (дата обращения 01.11.2024).
15. SX1276/77/78/79 - 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver [Электронный ресурс]. – URL: https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/SX1278%20Lora%20Datasheet.pdf (дата обращения 01.11.2024).
16. Performance line, ARM-based 32-bit MCU with Flash, USB, CAN, seven 16-bit timers, two ADCs and nine communication interfaces [Электронный ресурс]. – URL: <http://inverter48.ru/datasheet/mcu/STM32F103C8T6.pdf?ysclid=m2swy5p2eh408905702> (дата обращения 01.11.2024).
17. Густомесов, В. А. Эконометрика: учеб. пособие/ В. А. Густомесов. – Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2007. – 128 с.
18. Шестакович, В. П. Основы численных методов: учеб.-метод. пособие/ В. П. Шестакович. – Минск: БГУИР, 2012. – 68 с. – ISBN 978-985-488-789-0.
19. Пономарев, А. Б. Методология научных исследований: учеб. пособие / А. Б. Пономарев, Э. А. Пикулева. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 186 с.
20. Малышева, Т. А. Численные методы и компьютерное моделирование. Лабораторный практикум по аппроксимации функций / Т. А. Малышева // Учебно-методическое пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – С. 33.

Поступила в редакцию 08.07.2025 г., рекомендована к печати 30.07.2025 г.

STUDYING THE EFFECT OF ENCODING SPEED ON THE DISTANCE, TIME AND DATA
TRANSFER RATE OVER THE LORA WIRELESS CONNECTION

Naumov M.A., Karpovskii A.IU., Kurnosov V.G.

The article discusses the impact of encoding speed on key parameters of LoRa wireless communication: distance, time, and speed. An experiment was conducted using the LoRa SX1278 module and the STM32F103C8T6 microcontroller under different signal-to-noise ratios and spectrum spreading factors. It was shown that the encoding speed of the transmitted packet affects the distance traveled by the signal, the time required for transmission, and the overall data transfer rate. The article presents data from several experiments conducted under different conditions. A comprehensive analysis of the experimental data is presented, which draws attention to the clear patterns and correlations observed during the experiment. The experimental data are approximated and the corresponding graphs are constructed.

Keywords: wireless communication, encoding rate, transmission distance, transmission time, transmission rate, LoRa, approximation, error.

Наумов Максим Александрович

младший научный сотрудник научно-исследовательского отдела автоматизации горных машин ГБУ «Автоматгормаш им. В.А. Антипова», аспирант кафедры автоматики и телекоммуникаций ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: maksim-naumov-99@bk.ru

Naumov Maksim Aleksandrovich

Junior researcher of the Scientific Research Department of Automation of Mining machines of the Automatgormash named after V.A. Antipov, postgraduate student of the Department of Automation and Telecommunications of the Donetsk National Technical University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

Карповский Артур Юрьевич

заведующий научно-исследовательским отделом автоматизации горных машин ГБУ «Автоматгормаш им. В.А. Антипова», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: oagm308@mail.ru

Karpovskii Artur Iurevich

Head of the Scientific Research Department of Automation of Mining Machines of the Automatgormash named after V.A. Antipov, Russian Federation, DPR, Donetsk.

Курносков Вячеслав Григорьевич

доктор технических наук, профессор, первый заместитель директора по научной работе ГБУ «Автоматгормаш им. В.А. Антипова», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: avtomatgormash@mail.ru

Kurnosov Viacheslav Grigorevich

Doctor of Technical Sciences, Professor, First Deputy Director for Scientific Work of the Automatgormash named after V.A. Antipov, Russian Federation, DPR, Donetsk.

МЕТОДИКА ПРЕДИКТИВНОГО КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

© 2025 *Остроумов О.А., Базир Г.И., Бычковский М.М., Лепешкин О.М.*

Для обеспечения функциональной устойчивости системы необходимо в любой момент времени иметь информацию о состоянии системы. Для этой цели в системах управления используется система контроля. Цель исследования: разработка модели предиктивного контроля процесса функционирования сложной технической системы, позволяющей сократить количество измерений, используемых в системе за счет использования профиля функционирования системы. Методы: использование процессного подхода, методы теории графов; методы теории матриц, методы теории множеств. Результаты: разработана методика, позволяющая сократить нагрузку на систему контроля за счет уменьшения количества измерений и информации, передаваемой в системе контроля, системе управления и связи. Практическая значимость: результаты исследования могут быть использованы при проектировании и построении различных сложных технических систем.

Ключевые слова: профиль, сложная техническая система, контроль, процесс функционирования, процесс управления, функции, задачи, ресурс.

Постановка задачи. В современном мире количество и значение сложных технических систем (СТС) только возрастает. Совершенствование систем и ее элементов приводит к появлению новых возможностей системы. Выполнение системой и ее элементами функций и задач становятся критически значимым для вышестоящей системы, системы управления, а также самой системы. В случае нарушения их выполнения, независимо от причин, может приводить к невозможности выполнения СТС своего предназначения [1, 2]. Возникает необходимость обеспечения устойчивого функционирования СТС, ее элементов, в первую очередь, с целью обеспечения выполнения требуемого набора функций и задач СТС [3-5].

Обеспечение функциональной устойчивости СТС является сложной задачей и возможно только при наличии достоверной информации о состоянии системы, ее элементах в любой момент времени, что требует контроля выполнения и способности выполнения функций и задач системы [6-8].

Процесс контроля является элементом системы управления, без которого принимать правильные управленческие решения проблематично [9, 10]. Контроль является одним из элементов процессного подхода, предложенного Демингом и Шухартом и включающего планирование, действие, контроль и исправление, который лежит в основе стандартов качества ИСО [3, 11, 12]. Реализация процессного подхода в цикле управления позволит своевременно выявлять изменение состояний СТС и ее элементов, которые могут привести к невозможности выполнения целевого предназначения СТС.

Современные подходы, системы, устройства контроля и мониторинга сетей и систем, как правило, используют два способа. В первом случае осуществляется постоянная передача данных о состоянии системы и ее элементов с заданным периодом обновления. В этом случае передается информации о контролируемом элементе, измеряемом параметре, его значении и может содержать информацию о времени измерения. Во втором случае передача информации при изменении состояния системы и ее элементов с указанием текущего значения параметра и предыдущего измеренного его значения.

Первый подход обладает высокой степенью детализации контроля системы, но избыточен в статическом режиме системы, кроме того требует значительных затрат на передачу информации, часто не содержащей полезных данных. Второй подход требует меньших затрат на передачу информации, т.к. объем ее меньше, однако в этом случае возможны ошибки и несвоевременное предоставление информации в систему управления об изменении состояния системы из-за неправильно выбранного критерия оценки.

Оба подхода не учитывают возможность влияния одного и того же параметра на выполнение различных функций и задач системы, что также приводит к избыточности измерений.

В работах [13, 14] предлагается постоянно последовательно измерять большое количество параметров структурных элементов системы, что сказывается на оперативности выявления и реагирования на изменение состояния СТС.

Кроме того, используемые подходы имеют ограниченную область применения и используются для контроля структурных элементов системы.

Возникают противоречия между потребностями системы управления в контроле функционирования СТС, состоящей из разнородных элементов и ее возможностями по реализации такого контроля. Данное противоречие обуславливает существование актуальной научной задачи, заключающейся в необходимости разработки методики предиктивного контроля процесса функционирования сложной технической системы позволяющая сократить количество контролируемых параметров за счет контроля не только структурных элементов системы, но и функций, задач, последовательности, времени начала и окончания их выполнения.

Суть методики заключается разработке подхода позволяющего сократить количество контролируемых параметров при контроле процесса функционирования СТС, а также уменьшении количества используемых в системе контроля приборов за счет учета последовательности и времени выполнения функций и задач СТС.

Показателями эффективности являются количество измеряемых параметров N_p , измерительных приборов $N_{ип}$ при контроле процесса функционирования СТС.

Вводимые ограничения:

задачи, функции системы определяются исходя из требований к целевому предназначению СТС и техническими возможностями элементов системы и их связями;

рассматриваемая система представляет собой множество разнородных элементов; требуемый для функционирования системы ресурс исправлен и имеется в наличии в системе;

используемые для контроля измерительные приборы исправны.

Исходными данными в методике являются:

состав сложной технической системы, включающий G элементов и L линий, и ее структура в виде графа $R = (G, L)$;

множество целей, которые необходимо выполнить СТС $A = \{A_1, A_2, \dots, A_q\}$;

множество функций, которые необходимо выполнить СТС $F_o = \{F_{o1}, F_{o2}, \dots, F_{oj}\}$;

множество задач, которые необходимо выполнить СТС $Z_o = \{Z_{o1}, Z_{o2}, \dots, Z_{oi}\}$;

множество ресурсов СТС, находящихся в ней $E = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$ [1, 3, 12];

множество измерительных приборов $N_{ип} = \{N_{ип1}, N_{ип2}, \dots, N_{ипn}\}$, использующихся для измерения множества параметров $N_p = \{N_{п1}, N_{п2}, \dots, N_{пп}\}$, характеризующих функционирование СТС.

Используемые методы: методы теории графов; методы теории матриц, методы теории вероятности, методы теории множеств.

Описание методики. Рассмотрим работу методики, основные элементы которой представлены блок-схемой (рис. 1-5).

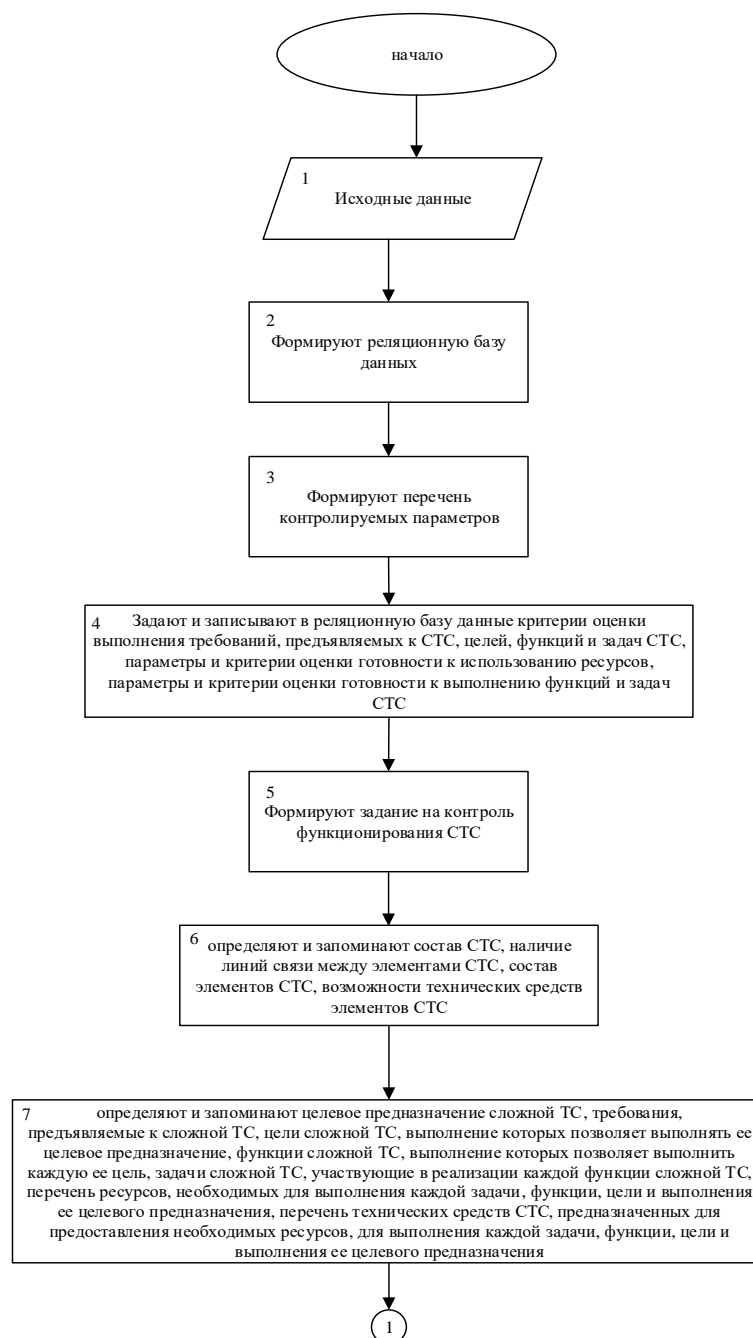


Рис. 1. Блок схема методики автоматизированного управления процессом построения сложной технической системы (начало)

Предварительно формируют реляционную базу данных (РБД) (блок 2 рис. 1), в которую в дальнейшем будет записываться исходные данные и информация о результатах контроля. На основе данных опыта предыдущей эксплуатации, а также требований, представленных в существующих ГОСТ (ОСТ) и других нормативных документах, регламентирующих требования к сложным техническим системам, а также потребностями вышестоящих систем, должностных лиц, в интересах которых функционируют СТС, формируют перечень контролируемых параметров СТС (блок 3 рис. 1).

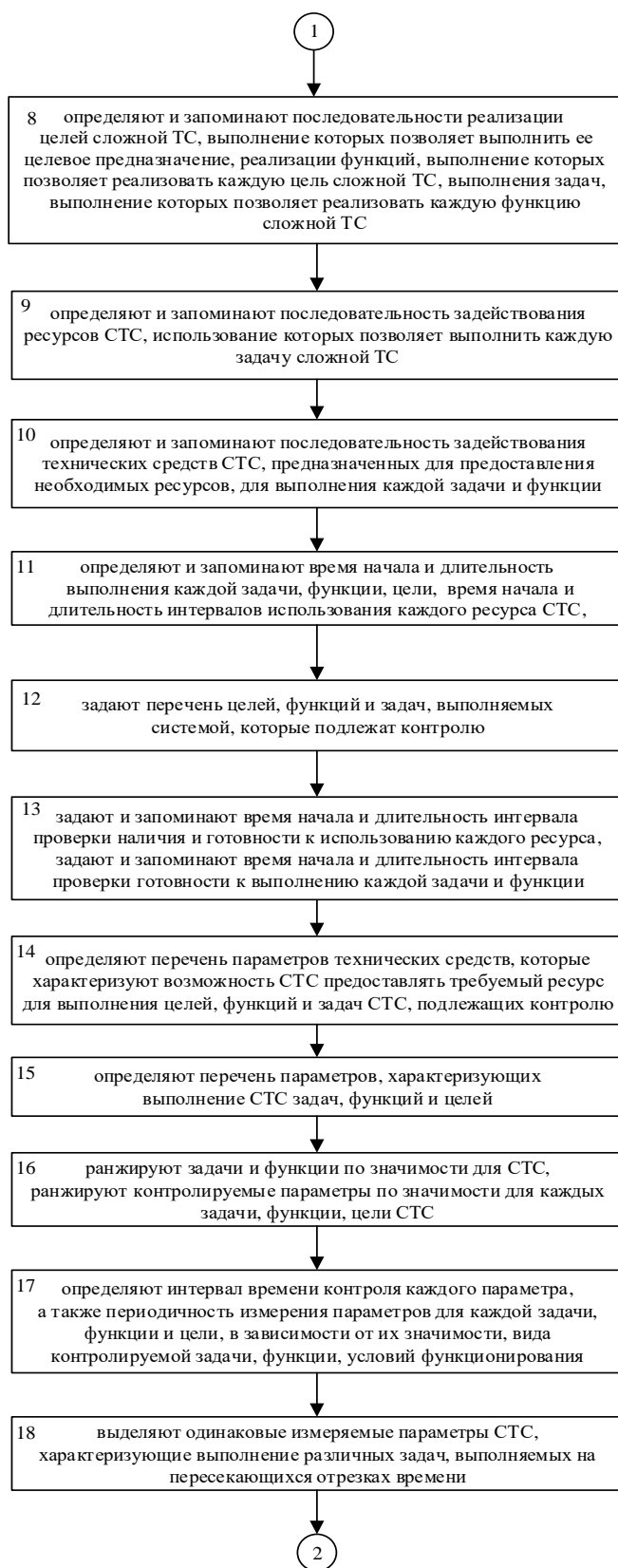


Рис. 2. Блок схема методики автоматизированного управления процессом построения сложной технической системы (продолжение)

Задают и записывают в РБД критерии оценки выполнения требований, предъявляемых к СТС, целей, функций и задач СТС, параметры и критерии оценки готовности к использованию ресурсов, параметры и критерии оценки готовности к выполнению функций и задач СТС (блок 4 рис. 1). Формируют задание на контроль функционирования СТС (блок 5 рис. 1).

Для формирования структуры СТС определяют состав СТС и наличие линий связи между элементами СТС (блок 6 рис. 1). Кроме этого, определяются состав элементов СТС и их возможности по предоставлению ресурсов для СТС и перечень параметров технических средств, которые характеризуют возможность СТС предоставлять требуемый ресурс для выполнения целей, функций и задач СТС, подлежащих контролю [8, 9, 15, 16]. Результаты формирования структуры СТС записываются в реляционную БД.

Параллельно этому и независимо формируют функциональную структуру СТС [12, 17], для чего определяют и запоминают целевое предназначение сложной ТС, определяются требования, предъявляемые к сложной ТС (блок 7 рис. 1), определяются цели СТС, определяется последовательность выполнения целей, которая позволяет выполнять целевое предназначение системы, определяются функции СТС (блок 7 рис. 1), выполнение которых позволяет выполнить цели СТС, определяется последовательность выполнения функций (блок 8 рис. 2), где определяется последовательность выполнения функций, которая позволяет выполнять цели системы.

Определяются задачи СТС (блок 7 рис. 1), выполнение которых позволяет выполнить функции СТС, определяется последовательность выполнения задач (блок 8 рис. 2), где определяется последовательность выполнения задач, которая позволяет выполнять функции системы, определяется время проверки, выполнения и задействования ресурсов для выполнения задач (блок 11 рис. 2).

Определяются перечень ресурсов СТС (блок 7 рис. 1), наличие которых позволяет выполнить задачи СТС, определяют последовательность задействования ресурсов (блок 9 рис. 2), определяется последовательность задействования ресурсов, которая позволяет выполнять задачи системы, определяется время проверки, выполнения и задействования (блок 11 рис. 2).

Определяют время проверки, выполнения и задействования (блок 11 рис. 2) определяют время начала и длительность выполнения каждой задачи, функции, цели, время начала и длительность интервалов использования каждого ресурса СТС.

Задают перечень целей, функций и задач системы, которые подлежат контролю в процессе функционирования СТС (блок 12 рис. 2).

Задают и запоминают время начала и длительность интервала проверки наличия и готовности к использованию каждого ресурса, задают и запоминают время начала и длительность интервала проверки готовности к выполнению каждой задачи и функции (блок 13 рис. 2), определяют перечень параметров технических средств, которые характеризуют возможность СТС предоставлять требуемый ресурс для выполнения целей, функций и задач СТС, подлежащих контролю (блок 14 рис. 2), определяют перечень параметров, характеризующих выполнение СТС задач, функций и целей (блок 15 рис. 2), определяют интервал времени контроля каждого параметра, а также периодичность измерения параметров для каждой задачи, функции и цели, в зависимости от их значимости, вида контролируемой задачи, функции, условий функционирования (блок 17 рис. 2).

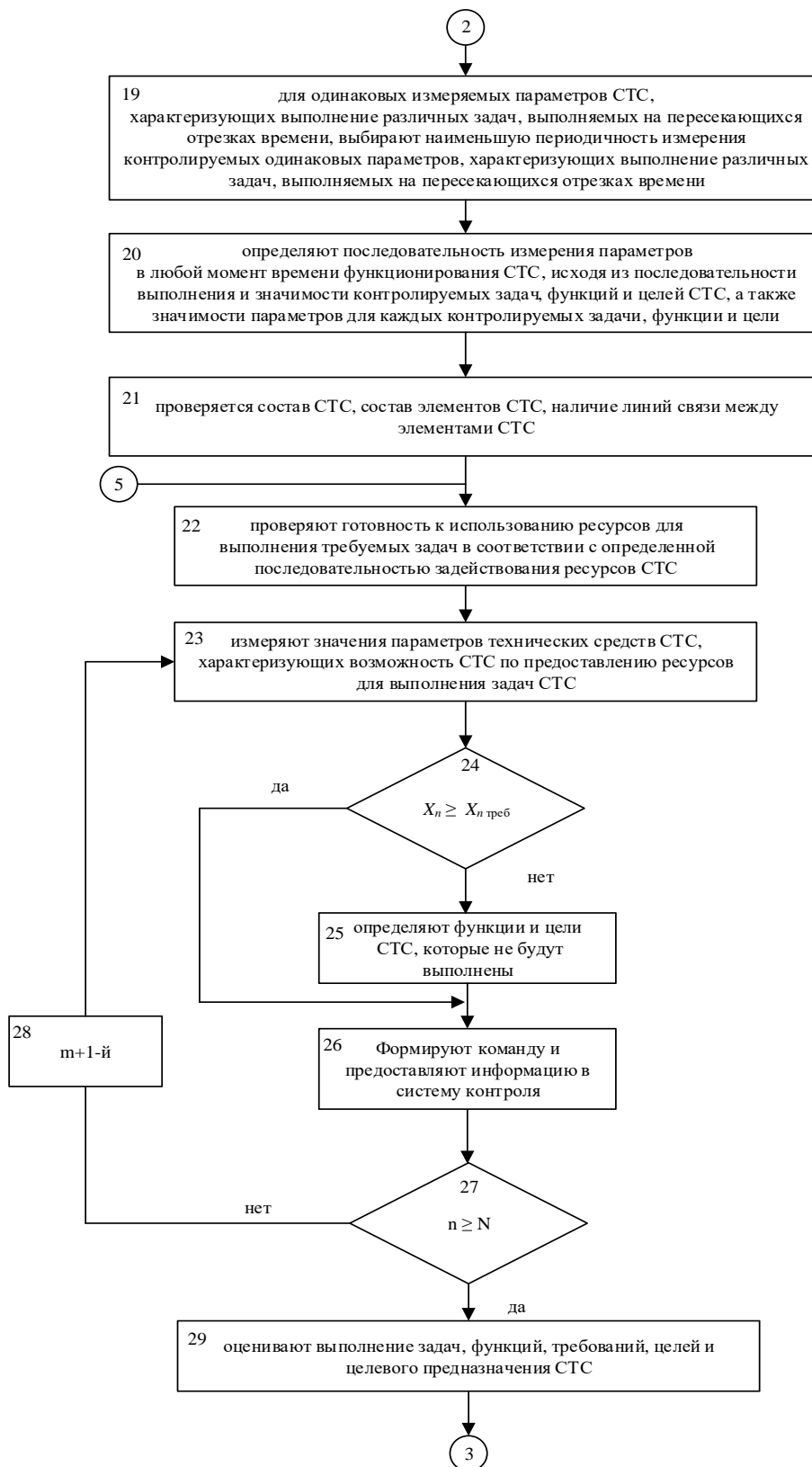


Рис. 3. Блок схема методики автоматизированного управления процессом построения сложной технической системы (продолжение)

Выделяют одинаковые измеряемые параметры СТС, характеризующие выполнение различных задач, выполняемых на пересекающихся отрезках времени (блок 18 рис. 2), для одинаковых измеряемых параметров СТС, характеризующих выполнение различных задач, выполняемых на пересекающихся отрезках времени, выбирают наименьшую периодичность измерения контролируемых одинаковых параметров, характеризующих выполнение различных задач, выполняемых на пересекающихся отрезках времени (блок 19 рис. 3), определяют последовательность измерения параметров в любой момент времени функционирования СТС, исходя из последовательности выполнения и значимости контролируемых задач, функций и целей СТС, а также значимости параметров для каждой контролируемой задачи, функции и цели (блок 20 рис. 3).

Осуществляют ранжирование задач и функций по значимости для СТС и ранжируют контролируемые параметры по значимости для каждой задачи, функции, цели СТС, информация о которых поступает из РБД (блок 16 рис. 2).

Проверяется состав СТС, состав элементов СТС, наличие линий связи между элементами СТС (блок 21 рис. 3).

Проверяется готовность к использованию ресурсов для выполнения требуемых задач (блок 22 рис. 3) в соответствии с определенной последовательностью задействования ресурсов СТС, для чего измеряют значения параметров технических средств СТС, характеризующих возможность СТС по предоставлению ресурсов для выполнения задач СТС (блок 23 рис. 3), сравнивают измеренные значения параметров с критериями их оценки, записанными в БД (блок 24 рис. 3).

Если значения измеренных параметров не соответствуют предъявляемым к ним требованиям, то определяют функции и цели, которые будут не выполнены из-за отсутствия возможности предоставить системой необходимый ресурс для выполнения задач СТС (блок 25 рис. 3) и предоставляют информацию в систему контроля и систему управления СТС. Если значения измеренных параметров соответствуют заданным требованиям, то информацию об этом передают в систему контроля (блок 26 рис. 3). Проверяют все ли параметры, которые необходимо было измерить, измерили (блок 27 рис. 3), если нет, выбирают следующий параметр, характеризующий возможности СТС по предоставлению ресурса (блок 28 рис. 3) и выполняют действия, представленные в блоках 23-26 рис. 4.

После измерения всех параметров, характеризующих возможность предоставления системой ресурса для выполнения задач СТС, оценивают выполнение задач, функций, требований, целей и целевого предназначения СТС (блок 29 рис. 3).

Оценивают выполнение задач СТС, для чего измеряют значения параметров, характеризующих выполнение задач СТС (блок 30 рис. 4), сравнивают измеренные значения параметров с критериями их оценки (блок 31 рис. 4), записанными в БД. Если значения измеренных параметров не соответствует требованиям, то оценивают выполнение задач СТС и определяют потребность СТС в ресурсах для выполнения контролируемых задач (блок 32 рис. 4). Если соответствуют, то передают информацию в систему контроля и систему управления СТС (блок 33 рис. 4).

Проверяют все ли параметры, которые необходимо было измерить, измерили (блок 34 рис. 4), если нет, выбирают следующий параметр, характеризующий выполнение задач СТС (блок 35 рис. 4) и выполняют действия, представленные в блоках 30-33 рис. 4.

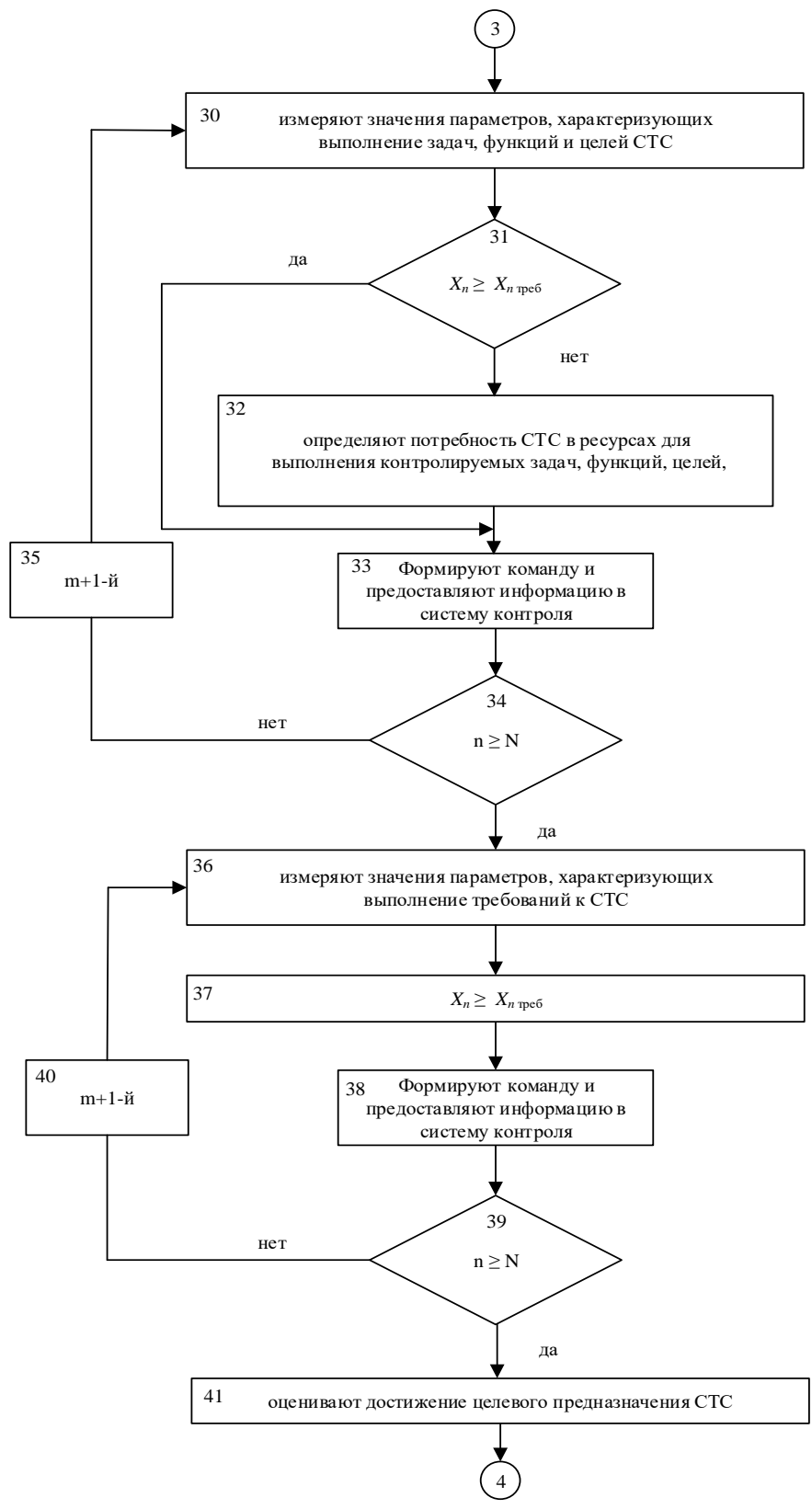


Рис. 4. Блок схема методики автоматизированного управления процессом построения сложной технической системы (продолжение)

Оценивают выполнение функций СТС для чего измеряют значения параметров, характеризующих их выполнение (блок 30 рис. 4), сравнивают измеренные значения параметров с критериями их оценки, записанными в БД (блок 31 рис. 4), оценивают выполнение функций СТС. Если значения измеренных параметров не соответствует требованиям, то информацию об этом передают в систему контроля и определяют потребность СТС в ресурсах для выполнения контролируемых функций (блок 32 рис. 4). Если значения измеренных параметров соответствуют заданным требованиям, то информацию об этом передают в систему контроля (блок 33 рис. 4). Проверяют все ли параметры, которые необходимо было измерить, измерили (блок 34 рис. 4), если нет, выбирают следующий параметр, характеризующий выполнение функций СТС (блок 35 рис. 4) и выполняют действия, представленные в блоках 30-33 рис. 4.

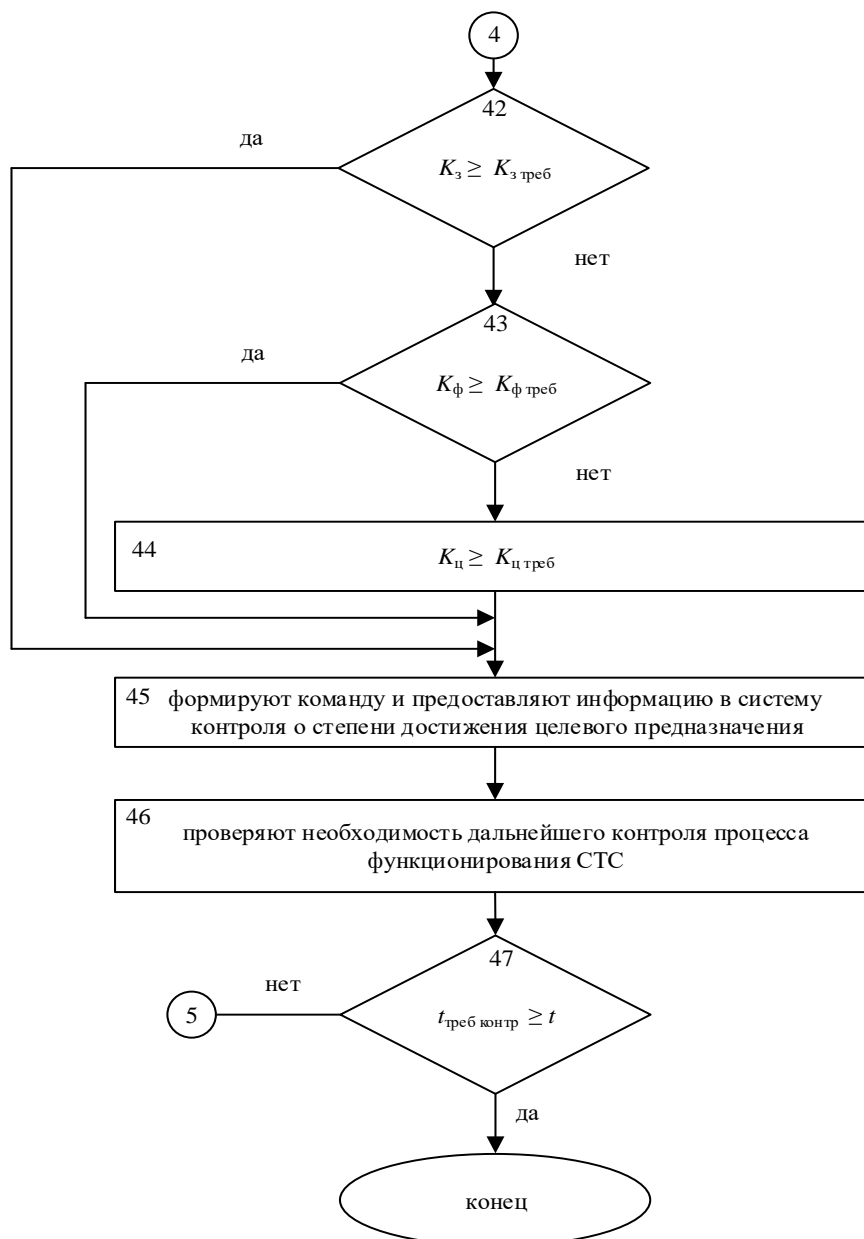


Рис. 5. Блок схема методики автоматизированного управления процессом построения сложной технической системы (окончание)

После измерения всех параметров, характеризующих выполнение задач, функций и целей СТС, оценивают выполнение требований, предъявляемых к СТС для чего измеряют значения параметров, характеризующих выполнение требований (блок 36 рис. 4), предъявляемых к СТС, сравнивают измеренные значения параметров с критериями их оценки, записанными в БД и информацию об этом передают в систему контроля (блок 38 рис. 4). Проверяют все ли параметры, которые необходимо было измерить, измерили (блок 39 рис. 4), если нет, выбирают следующий параметр, характеризующий выполнение требований к СТС (блок 40 рис. 4) и выполняют действия, представленные в блоках 36-38 рис. 4.

После измерения всех параметров, характеризующих выполнение требований, предъявляемых к СТС, оценивают выполнение целей СТС для чего измеряют значения параметров, характеризующих выполнение целей СТС (блок 30 рис. 4), сравнивают измеренные значения параметров с критериями их оценки (блок 31 рис. 4), записанными в БД, оценивают выполнение целей СТС и определяют потребность СТС в ресурсах для выполнения контролируемых целей (блок 32 рис. 4).

Проверяют все ли параметры, которые необходимо было измерить, измерили (блок 34 рис. 4), если нет, выбирают следующий параметр, характеризующий выполнение целей СТС (блок 35 рис. 4) и выполняют действия, представленные в блоках 30-33 рис. 4.

Оценивают достижение целевого предназначения СТС (блок 41 рис. 4), для чего сравнивают количество выполненных и запланированных к выполнению задач (блок 42 рис. 5), функций (блок 43 рис. 5), целей СТС (блок 44 рис. 5), при условии выполнения, предъявляемых к СТС требований.

Результаты контроля (блоки 24, 31, 37, 42, 43 и 44 рис. 3, 4, 5) и сравнения параметров с критериями поступают в РБД, где запоминаются (блоки 26, 33, 38 и 45 рис. 3, 4, 5), где происходит обработка результатов контроля, информация о котором запоминаются в РБД.

Повторяют действия по контролю функционирования СТС до момента прекращения ее функционирования или выполнения целевого предназначения, при этом проверяется необходимость дальнейшего контроля процесса функционирования (блок 46 рис. 5), для чего оценивают время функционирования системы или выполнение целевого предназначения (блок 47 рис. 5). Если целевое предназначение выполнено или СТС прекратила функционирование, то прекращают контроль, иначе продолжают контроль.

Оценка эффективности. Для оценки эффективности использования предложенной методики рассмотрим пример контроля двух задач Z_1 и Z_2 . На рисунке 6 поясняется уменьшение количества измерений контролируемых параметров элементов СТС. При выполнении первой задачи производится измерение параметров x , y и z , при выполнении второй задачи – параметров x , k и t , как показано на рисунке 6. Проведя анализ последовательности и периодов измерения параметров при выполнении каждой задачи можно сделать вывод, что на ограниченном отрезке времени производится одновременное выполнение и контроль двух задач, при этом, контроль характеризуется, в том числе, измерением параметра x . Оптимальная частота измерения контролируемых параметров для каждой задачи может быть разная. Если выполнение обеих задач, характеризуется одинаковым параметром, то для пересекающегося отрезка времени выполнения двух контролируемых задач выбирают отрезки времени, через которые происходит контроль одинакового параметра, соответствующий наименьшему отрезку времени.

Для контроля выполнения первой задачи требуется измерение параметра x четыре раза, а для второй задачи 7 раз, что в сумме дает 11 измерений. Используя предложенную методику на основании анализа последовательности и интервалов измерения параметра x количество измерений можно сократить до 9 раз.

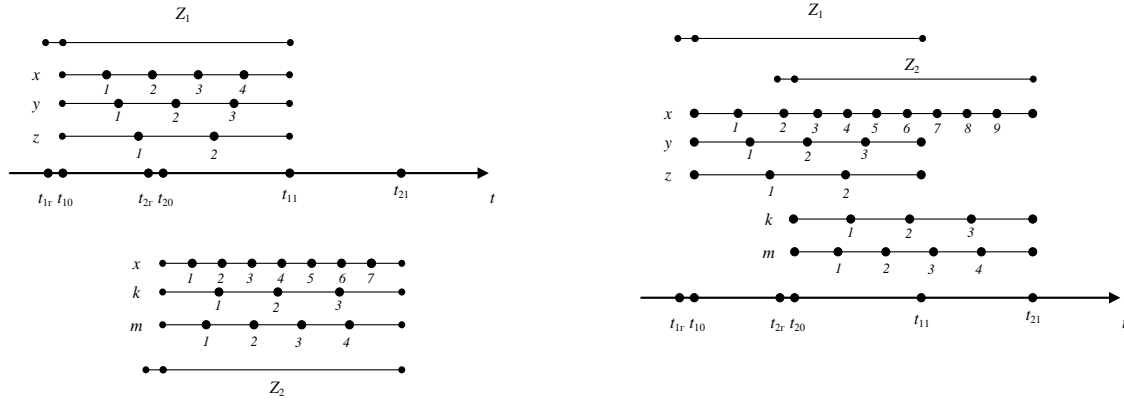


Рис. 6. Схема формирования множества и последовательности контролируемых параметров для двух задач СТС

В качестве показателя оценки эффективности предложенной методики предлагается использовать коэффициент выполнения задач, функций, целей СТС выполнение которых осуществляется в процессе функционирования СТС:

$$K_{ц} = \frac{N_{ц\text{вып}}}{N_{ц\text{план}}},$$

где $N_{ц\text{вып}}$ – количество выполненных целей системы, $N_{ц\text{план}}$ – общее количество запланированных к выполнению целей системы,

$$K_{ф} = \frac{N_{ф\text{вып}}}{N_{ф\text{план}}},$$

где $N_{ф\text{вып}}$ – количество выполненных функций системы, $N_{ф\text{план}}$ – общее количество запланированных к выполнению функций системы,

$$K_{з} = \frac{N_{з\text{вып}}}{N_{з\text{план}}},$$

где $N_{з\text{вып}}$ – количество выполненных задач системы, $N_{з\text{план}}$ – общее количество запланированных к выполнению задач системы.

Эффективность использования измерительных приборов определяется через коэффициент использования приборов:

$$K_{ип} = \frac{N_{ип\text{исп}}}{N_{ип\text{план}}},$$

где $N_{ип\text{исп}}$ – количество использованных измерительных приборов при контроле СТС, после использования методики, $N_{ип\text{план}}$ – общее количество спланированных к использованным измерительных приборов для контроля СТС, и коэффициент сокращения измеряемых параметров:

$$K_{п} = \frac{N_{п\text{изм}}}{N_{п\text{план}}},$$

где $N_{п\text{ изм}}$ – количество измерений параметров при контроле функционирования СТС, произведенное после использования методики, $N_{п\text{ план}}$ – количество измерений параметров при контроле функционирования СТС, которые необходимо было выполнить до использования методики.

Научная новизна методики заключается в том, что в отличие от известных методик позволяет:

основным элементом системы контроля СТС выступает профиль процесса функционирования системы, характеризующий ее способность выполнять функции, задачи и цели;

позволяет осуществлять контроль всех процессов системы в любой момент времени;

учитывает порядок контроля параметров системы и периоды контроля, что позволяет сократить количество измерений контролируемых параметров;

сократить количество используемых в системе приборов измерения параметров СТС и ее элементов.

Заключение. Таким образом эффект методики определяется возможностью сократить количество измеряемых параметров, количество измерений параметров, а также количество используемых в процессе контроля измерительных приборов. Полученный эффект достигается за счет использования при контроле процесса функционирования СТС профиля функционирования системы, определения последовательности выполнения целей, функций и задач системы, а также какие используются для их выполнения элементы СТС. За счет снижения количества измерений, снижается время задействования измерительных приборов для контроля процесса функционирования СТС, а также нагрузка на систему контроля, систему управления и систему связи за счет уменьшения количество передаваемой и обрабатываемой ими информации о системе и результатах контроля [18-20]. Предложенная методика может использоваться при создании современных систем управления [21, 22], для оптимизации использования ресурсов системы в условиях обеспечения ее устойчивого функционирования [23, 24] и выполнения требуемого набора функций СТС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Остроумов, О. А. Модель контроля функционирования системы связи / О. А. Остроумов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – № 3. – 2022. – С. 300-310.
2. Иванов, С. А. Методика обеспечения функционирования информационного направления в сети связи с памятью в условиях нестабильности характеристик элементов сети / С. А. Иванов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 11. – С. 91-98.
3. Концептуальная модель контроля функций системы связи для выявления конфликтных ситуаций / А. Д. Синюк, А. И. Сатдинов, Ю. В. Кондрашов, О. А. Остроумов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2022. – Т. 16, № 5. – С. 21-27.
4. Макаренко, С. И. Автоматизированная система управления беспилотными летательными аппаратами при совместном решении ими специальных задач / С. И. Макаренко, К. В. Козлов // Системы управления, связи и безопасности. – 2025. – № 1. – С. 131-155.
5. Иванов, С. А. Методика оценки информированности источника деструктивных воздействий о структуре корпоративной системы управления / С. А. Иванов // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – № 1-2 (163-164). – 2022. – С. 80-86.
6. Predictive control approach incorporating incremental learning / J. Chen, H. Pan, K. Zhang [et al.] // Applied Intelligence. – 2025. – Vol. 55, No. 6. – P. 401. – DOI 10.1007/s10489-025-06243-5.
7. Intelligent monitoring system for environmental protection during the construction period of pumped storage power station / Sh. Xu, X. Li, Q. Liu [et al.] // Cluster Computing. – 2025. – Vol. 28, No. 2. – P. 100. – DOI 10.1007/s10586-024-04806-8.

8. Kobrinskii, B. A. Principles of Construction System for Monitoring the Psychoemotional State and Health of Critical Infrastructure Operators / B. A. Kobrinskii, N. A. Blagosklonov, O. G. Grigoriev // Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications. – 2024. – Vol. 34, No. 3. – P. 780-785. – DOI 10.1134/S1054661824700664.
9. Методика повышения эффективности управления ресурсоемкими задачами в распределенных вычислительных системах / Ч. М. Аунг, А. А. Анисимов, Е. М. Портнов, Л. Г. Гагарина // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 2(62). – С. 13. – EDN TNYKSW.
10. Yan, F. Adaptive estimation and control for uncertain nonlinear systems and full actuation control / F. Yan, M. Zhang, G. Gu // Science China Information Sciences. – 2023. – Vol. 66, No. 11. – P. 212204. – DOI 10.1007/s11432-022-3737-4.
11. Проблема обеспечения функциональной устойчивости и непрерывности функционирования системы связи / О. М. Лепешкин, О. А. Остроумов, А. Д. Синюк, И. С. Черных // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2023. – Т. 20, № 4(226). – С. 16-26.
12. Методика обеспечения функциональной устойчивости системы связи за счет выявления конфликтов / О. М. Лепешкин, О. А. Остроумов, Н. В. Михайличенко, А. С. Пермяков // Информатика и автоматизация. – 2024. – Т. 23, № 1. – С. 226-258.
13. Патент № 2210112 С2 Российская Федерация, МПК G07C 3/08, G06F 17/00, G07C 3/00. Унифицированный способ Чернякова/Петрушина для оценки эффективности больших систем: № 2001115342/09: заявл. 07.06.2001: опубл. 10.08.2003 / М. В. Черняков, А. С. Петрушин.
14. Лысов, А. В. Телефон и безопасность. Проблемы защиты информации в телефонных сетях / А. В. Лысов, А. Н. Остапенко. – СПб.: Политехника, 1995. – 109 с.
15. Optimizing the resource allocation in cyber physical energy systems based on cloud storage and IoT infrastructure / Zh. Bai, C. Li, Ja. Pourzamani [et al.] // Journal of Cloud Computing. – 2024. – Vol. 13, No. 1. – P. 59. – DOI 10.1186/s13677-024-00615-x.
16. Tsiramua, S. Logical-Probabilistic Modeling and Structural Analysis of Reconfigurable Systems Composed of Multifunctional Elements / S. Tsiramua, H. Meladze, T. Davitashvili // Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications. – 2024. – Vol. 34, No. 1. – P. 144-157. – DOI 10.1134/S1054661824010218.
17. Макаренко, С. И. Структурно-функциональная модель интероперабельности организационно-технических систем / С. И. Макаренко, А. А. Нестеров // Труды учебных заведений связи. – 2023. – Т. 9, № 4. – С. 65-74.
18. Chernyshev, L. S. A Method of Optimal Control of a Technical System or Process Using the Neural Network Model and the Thompson Sampling Algorithm / L. S. Chernyshev // Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications. – 2023. – Vol. 33, No. 3. – P. 247-254. – DOI 10.1134/S1054661823030069.
19. Yang, Xi. Construction of integrated network order system of main distribution network based on power grid operation control platform / Xi. Yang, K. Jia, Z. Peng // Energy Informatics. – 2024. – Vol. 7, No. 1. – P. 70. – DOI 10.1186/s42162-024-00368-6.
20. Generative AI and Cognitive Computing-Driven Intrusion Detection System in Industrial CPS / Sh. Islam, D. Javed, M. Sh. Saeed [et al.] // Cognitive Computation. – 2024. – DOI 10.1007/s12559-024-10309-w.
21. Rossikhina, L. V. Information Support for Decision-Making in the Management of Regional Investment and Construction Projects: A Systematic Approach / L. V. Rossikhina, D. E. Orlova, V. A. Chertov // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. – 2024. – Vol. 58, No. 3. – P. 188-199.
22. A data-driven intelligent decision support system that combines predictive and prescriptive analytics for the design of new textile fabrics / R. Ribeiro, A. Pilastrri, C. Moura [et al.] // Neural Computing & Applications. – 2023. – Vol. 35, No. 23. – P. 17375-17395. – DOI 10.1007/s00521-023-08596-9.
23. Коцыняк, М. А. Методика оценки устойчивости информационно-телекоммуникационной сети в условиях информационного противоборства / М. А. Коцыняк, О. С. Лаута, А. П. Нечепуренко // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2019. – № 1-2 (127-128). – С. 58-62.
24. Одоевский, С. М. Методика оценки устойчивости функционирования системы технологического управления инфокоммуникационной сетью специального назначения с заданной топологической и функциональной структурой / С. М. Одоевский, П. В. Лебедев // Системы управления, связи и безопасности. – 2021. – № 1. – С. 152-189. – DOI: 10.24411/2410-9916-2021-10107.

Поступила в редакцию 11.07.2025 г., рекомендована к печати 05.08.2025 г.

METHOD OF PREDICTIVE CONTROL OF THE FUNCTIONING PROCESS OF A COMPLEX TECHNICAL SYSTEM

Ostroumov O.A., Bazir G.I., Bychkovskii M.M., Lepeshkin O.M.

To ensure the functional stability of the system, it is necessary to have information about the state of the system at any time. For this purpose, a control system is used in control systems. Objective of the study: to develop a model of predictive control of the functioning process of a complex technical system, which allows to reduce the number of measurements used in the system by using the system functioning profile. Methods: using the process approach, graph theory methods; matrix theory methods, set theory methods. Results: a technique has been developed that allows to reduce the load on the control system by reducing the number of measurements and information transmitted in the control system, control and communication system. Practical significance: the results of the study can be used in the design and construction of various complex technical systems.

Keywords: profile, complex technical system, control, functioning process, management process, functions, tasks, resource.

Остроумов Олег Александрович

кандидат технических наук, преподаватель кафедры общепрофессиональных дисциплин ФГКВОУ ВО «Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного», Российская Федерация, г. Санкт-Петербург.
E-mail: oleg-26stav@mail.ru

Ostroumov Oleg Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Lecturer at Department of General Professional Disciplines of the Military Academy of Communications, Russian Federation, St. Petersburg.

Базир Геннадий Иванович

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общепрофессиональных дисциплин ФГКВОУ ВО «Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного», Российская Федерация, г. Санкт-Петербург.
E-mail: oleg-26stav@mail.ru

Bazir Gennadii Ivanovich

Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of General Professional Disciplines of the Military Academy of Communications, Russian Federation, St. Petersburg.

Бычковский Михаил Михайлович

преподаватель кафедры технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления ФГКВОУ ВО «Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного», Российская Федерация, г. Санкт-Петербург.
E-mail: lepechkin1@mail.ru

Bychkovskii Mikhail Mikhailovich

Lecturer at Department of Technical Support of Communications and Automated Control Systems of the Military Academy of Communications, Russian Federation, St. Petersburg.

Лепешкин Олег Михайлович

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры безопасности инфокоммуникационных систем специального назначения ФГКВОУ ВО «Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного», Российская Федерация, г. Санкт-Петербург.
E-mail: lepechkin1@mail.ru

Lepeshkin Oleg Mikhailovich

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at Department of Security of Special-Purpose Infocommunication Systems of the Military Academy of Communications, Russian Federation, St. Petersburg.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАЙЕСОВСКОГО ПОДХОДА К ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ И ПРИНЯТИЮ РЕШЕНИЙ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ И НЕПОЛНОТЫ ИНФОРМАЦИИ

© 2025 Звягин Л.С.

Современные информационно-измерительные системы сталкиваются с возрастающей сложностью задач обработки данных в условиях значительной неопределенности входных параметров и неполноты измерительной информации. Байесовский подход представляет математически обоснованную парадигму для количественной оценки и управления неопределенностью через последовательное обновление вероятностных моделей на основе поступающих измерительных данных. Целью исследования является разработка комплексной методологии применения байесовских методов в информационно-измерительных системах для повышения точности оценки состояния контролируемых объектов и надежности принимаемых решений. Экспериментальная верификация проводилась на базе многоканальной измерительной системы мониторинга промышленного оборудования, включающей 156 измерительных каналов различной физической природы с непрерывным сбором данных в течение 8 месяцев 2024 года. Результаты показали повышение точности измерений на 18,3% при снижении среднеквадратичной ошибки прогнозирования на 24,7% по сравнению с традиционными детерминистическими методами. Байесовская калибровка сенсорных систем обеспечила сокращение времени адаптации к изменяющимся условиям эксплуатации с 45 до 12 секунд при одновременном снижении ложных срабатываний системы диагностики на 42%. Практическая значимость работы заключается в создании теоретической основы для проектирования адаптивных информационно-измерительных систем нового поколения, способных функционировать в условиях многофакторной неопределенности с количественной оценкой достоверности результатов измерений.

Ключевые слова: байесовский вывод, информационно-измерительные системы, калибровка сенсоров, неопределенность измерений, адаптивные алгоритмы, принятие решений.

Введение. Развитие современных информационно-измерительных систем характеризуется переходом к решению многомерных задач обработки данных в условиях значительной априорной неопределенности параметров контролируемых процессов и ограниченности доступной измерительной информации [1]. Фундаментальные исследования последних лет демонстрируют критическую важность разработки методов, способных обеспечить эффективную интеграцию информации из разнородных источников при наличии статистических и эпистемических неопределенностей [2]. Байесовский подход к анализу данных предоставляет математически строгую основу для решения подобных задач, поскольку позволяет формализовать процедуры обновления знаний о состоянии системы по мере поступления новых измерительных данных и обеспечивает количественную оценку достоверности принимаемых решений [3]. Теоретические основы байесовского вывода находят все более широкое применение в области разработки интеллектуальных информационно-измерительных систем, где требуется обеспечение высокой точности измерений при минимизации влияния случайных и систематических погрешностей. Ключевыми преимуществами байесовских методов является возможность инкорпорирования априорных знаний о физических процессах в алгоритмы обработки данных, адаптивного управления параметрами измерительных каналов в реальном времени и получения вероятностных оценок неопределенности результатов измерений.

Современные исследования в области машинного обучения для задач количественной оценки неопределенности подтверждают эффективность байесовских методов при решении сложных инженерных задач, включая прямые и обратные задачи анализа неопределенности, диагностику отказов и оценку устойчивости системы [4]. Практические применения байесовской калибровки сенсорных систем демонстрируют существенные преимущества в точности и надежности измерений по сравнению с традиционными подходами [5].

Анализ терминологического аппарата выявляет существенные различия в интерпретации понятий алеаторической и эпистемической неопределенности в контексте информационно-измерительных систем. Алеаторическая неопределенность традиционно ассоциируется с внутренней стохастичностью измеряемых процессов и может быть количественно охарактеризована средствами классической теории вероятностей, тогда как эпистемическая неопределенность отражает ограниченность знаний о параметрах математических моделей системы [6]. В рамках данного исследования под байесовским подходом понимается совокупность математических методов, основанных на теореме Байеса и позволяющих осуществлять последовательное обновление вероятностных распределений параметров системы по мере поступления новых наблюдений. Информационно-измерительная система рассматривается как совокупность технических средств, алгоритмического обеспечения и методических процедур, предназначенных для автоматизированного получения, обработки, передачи и представления измерительной информации о состоянии контролируемых объектов или процессов.

Систематический анализ современной научной литературы позволяет выделить несколько ключевых нерешенных проблем в области применения байесовских методов в информационно-измерительных системах. Первая проблема связана с отсутствием универсальных подходов к формированию априорных распределений для параметров измерительных моделей в условиях ограниченной информации о физических процессах [7]. Вторая проблема касается вычислительной сложности байесовского вывода для высокоразмерных задач, характерных для современных распределенных измерительных систем [8]. Третья проблема заключается в недостаточной проработке методов валидации байесовских моделей в контексте специфических требований метрологического обеспечения измерительных процедур [9]. Четвертая проблема связана с необходимостью разработки адаптивных алгоритмов, способных автоматически корректировать параметры байесовских моделей при изменении условий эксплуатации измерительной системы.

Уникальность предлагаемого подхода заключается в интеграции современных достижений теории байесовского вывода с метрологическими принципами обеспечения точности измерений и разработке комплексной методологии применения вероятностных методов для повышения эффективности информационно-измерительных систем в условиях многофакторной неопределенности. Научная новизна исследования определяется разработкой теоретических основ адаптивной байесовской калибровки параметров информационно-измерительных систем и созданием алгоритмических решений для реализации динамического обновления вероятностных моделей измерительных процессов в реальном времени.

Методы. Методологическая основа исследования базируется на интеграции классических принципов теории байесовского вывода с современными подходами к анализу неопределенности в технических системах.

Выбор байесовского подхода обусловлен его способностью обеспечивать математически корректное обновление знаний о состоянии измерительной системы при поступлении новых данных, что критически важно для задач реального времени в информационно-измерительных системах [10]. Вариационный байесовский вывод применялся для аппроксимации апостериорных распределений параметров в случаях высокой размерности пространства состояний, что обеспечивает вычислительную эффективность алгоритмов [11]. Методы активного обучения использовались для оптимизации процедур сбора измерительной информации с целью максимизации информационной ценности каждого нового наблюдения. Гауссовские процессы применялись в качестве непараметрических априорных распределений для моделирования сложных нелинейных зависимостей между измеряемыми величинами и параметрами состояния контролируемых объектов [12].

Экспериментальное исследование проводилось на базе информационно-измерительной системы мониторинга состояния промышленного оборудования химического производства, включающей 156 измерительных каналов различной физической природы: термометрические (62 канала), манометрические (38 каналов), расходометрические (31 канал), аналитические (25 каналов). Сбор данных осуществлялся в период с апреля по ноябрь 2024 года с частотой дискретизации 0,1 Гц для медленно изменяющихся процессов и 10 Гц для динамических параметров. Общий объем обработанных данных составил 1,87 терабайта измерительной информации. Калибровка измерительных каналов проводилась согласно требованиям ГОСТ 8.568-2017 с использованием эталонных средств измерений класса точности 0,1. Критерии включения данных в выборку: стабильность функционирования измерительного оборудования, отсутствие внештатных режимов работы технологического процесса, полнота записи данных не менее 97% от планового времени наблюдений.

Статистический анализ включал оценку стационарности временных рядов с использованием расширенного теста Дики-Фуллера, анализ кросс-корреляционных связей между измерительными каналами, идентификацию периодических компонент методом спектрального анализа. Байесовская калибровка модели осуществлялась с применением вариационного подхода с автоматической дифференциацией. Гиперпараметры априорных распределений определялись методом максимального правдоподобия с последующей валидацией на независимой тестовой выборке объемом 25% от общего массива данных. Качество байесовских моделей оценивалось с использованием информационного критерия WAIC (Widely Applicable Information Criterion) и показателей предсказательной способности. Вычислительная реализация алгоритмов выполнялась в среде Python 3.11 с использованием библиотек PyMC 5.0 для байесовского вывода и TensorFlow Probability для вариационной оптимизации.

Математическая основа байесовского подхода в информационно-измерительных системах базируется на теореме Байеса, которая позволяет обновлять знания о параметрах системы θ при поступлении новых измерительных данных y :

$$p(\theta|y) = \frac{p(\theta|y)p(\theta)}{p(y)},$$

где $p(\theta|y)$ – апостериорное распределение параметров после получения данных; $p(y|\theta)$ – функция правдоподобия, описывающая вероятность наблюдения данных y при заданных параметрах θ ; $p(\theta)$ – априорное распределение параметров, отражающее предварительные знания о системе; $p(y)$ – маргинальная вероятность данных (нормализующая константа).

Для измерительных систем с гауссовым шумом функция правдоподобия принимает вид:

$$p(\theta|y) = \prod_{i=1}^N \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \right) \exp \left(-\frac{(y_i - f(x_i, \theta))^2}{2\sigma_i^2} \right),$$

где N – количество измерений; y_i – i -е измеренное значение; $f(x_i, \theta)$ – модель измерительного процесса; x_i – входные условия i -го измерения; σ_i^2 – дисперсия шума i -го измерения.

Вариационный байесовский вывод аппроксимирует истинное апостериорное распределение $q(\theta)$ путем минимизации дивергенции Кульбака-Лейблера:

$$KL[q(\theta) \| p(\theta|y)] = \int q(\theta) \log \left(\frac{q(\theta)}{p(\theta|y)} \right) d\theta,$$

где $KL[\cdot \| \cdot]$ – дивергенция Кульбака-Лейблера; $q(\theta)$ – вариационная аппроксимация апостериорного распределения.

Оптимизация осуществляется максимизацией вариационной нижней границы (ELBO):

$$ELBO = \mathbb{E}_{q[\log p(y|\theta)]} - KL[q(\theta) \| p(\theta)],$$

где $\mathbb{E}_{q[\cdot]}$ – математическое ожидание относительно распределения $q(\theta)$.

Для моделирования сложных нелинейных зависимостей в измерительных системах применялись гауссовские процессы с ковариационной функцией:

$$k(x_i, x_j) = \sigma_f^2 \exp \left(\frac{-\frac{1}{2} \sum_{d=1}^D (x_i^d - x_j^d)^2}{l_d^2} \right) + \sigma_n^2 \delta_{ij},$$

где σ_f^2 – дисперсия сигнала; l_d – характерный масштаб по d -й координате; D – размерность входного пространства; σ_n^2 – дисперсия шума; δ_{ij} – символ Кронекера.

Предсказательное распределение для новых измерений y^* при заданных входных условиях x^* вычисляется как:

$$p(y^* | x^*, X, y) = \int p(y^* | x^*, \theta) p(\theta | X, y) d\theta,$$

где X – матрица входных условий обучающих данных; данный интеграл обеспечивает учет неопределенности в параметрах модели при формировании прогнозов.

Адаптивное обновление параметров измерительной модели в реальном времени реализуется через рекурсивное применение правила Байеса:

$$p(\theta | y^1 : t) = \frac{p(y^t | \theta, y^1 : t^{-1}) p(\theta | y^1 : t^{-1})}{p(y^t | y^1 : t^{-1})},$$

где $y^1:t$ – последовательность измерений от момента 1 до t ; данная формула позволяет последовательно обновлять знания о параметрах системы по мере поступления новых измерительных данных без необходимости пересчета всей истории наблюдений.

Результаты исследования. Комплексный анализ эффективности байесовского подхода в информационно-измерительных системах продемонстрировал значительные преимущества по сравнению с традиционными методами обработки данных в условиях неопределенности [13]. Результаты экспериментального исследования свидетельствуют о качественном повышении точности оценки состояния контролируемых объектов при использовании адаптивных байесовских алгоритмов. Анализ данных 156 измерительных каналов выявил существенную неоднородность распределения погрешностей измерений в зависимости от типа сенсорного оборудования и условий эксплуатации. Статистическая обработка результатов показала статистически значимое улучшение основных метрологических характеристик информационно-измерительной системы при внедрении байесовских методов. Динамическое обновление параметров измерительных моделей обеспечило адаптацию системы к изменяющимся условиям эксплуатации без необходимости остановки технологического процесса. Анализ временных характеристик алгоритмов подтвердил возможность реализации байесовского подхода в системах реального времени с ограничениями по вычислительным ресурсам. Валидация разработанных методов на независимых данных показала устойчивость полученных результатов к вариациям условий эксплуатации и высокую обобщающую способность байесовских моделей.

Таблица 1. Сравнительный анализ точности измерений для различных типов сенсорных каналов

Тип измерительного канала	Количество каналов	Традиционный подход (σ , %)	Байесовский подход (σ , %)	Улучшение точности (%)	Доверительный интервал (95%)
Термометрические	62	1,87	1,49	20,3	[18,1; 22,7]
Манометрические	38	1,56	1,32	15,4	[12,8; 18,2]
Расходомерические	31	2,34	1,89	19,2	[16,5; 22,1]
Аналитические	25	2,12	1,68	20,8	[17,9; 23,9]
Общий показатель	156	1,97	1,61	18,3	[16,7; 19,9]

Анализ данных таблицы 1 демонстрирует устойчивое повышение точности измерений для всех типов сенсорных каналов при применении байесовского подхода. Наибольшее улучшение точности наблюдается для аналитических каналов (20,8%), что связано с высокой степенью нелинейности характеристик данного типа датчиков и эффективностью байесовской калибровки в условиях сложных многофакторных зависимостей. Термометрические каналы показали улучшение точности на 20,3%, что обусловлено эффективным учетом температурных дрейфов сенсоров через байесовское обновление параметров модели. Манометрические каналы характеризуются наименьшим улучшением (15,4%) в связи с изначально высокой линейностью характеристик и стабильностью параметров.

Экспериментальные исследования подтверждают значительные преимущества байесовского подхода в информационно-измерительных системах различного назначения (рисунок 1). Анализ 156 измерительных каналов четырех типов демонстрирует устойчивое повышение точности: наибольшее улучшение получено для аналитических каналов (20,8%), наименьшее - для манометрических (15,4%). Общее улучшение точности составляет 18,3% с доверительным интервалом [16,7; 19,9%].

Сравнительный анализ эффективности байесовского и традиционного подходов в информационно-измерительных системах

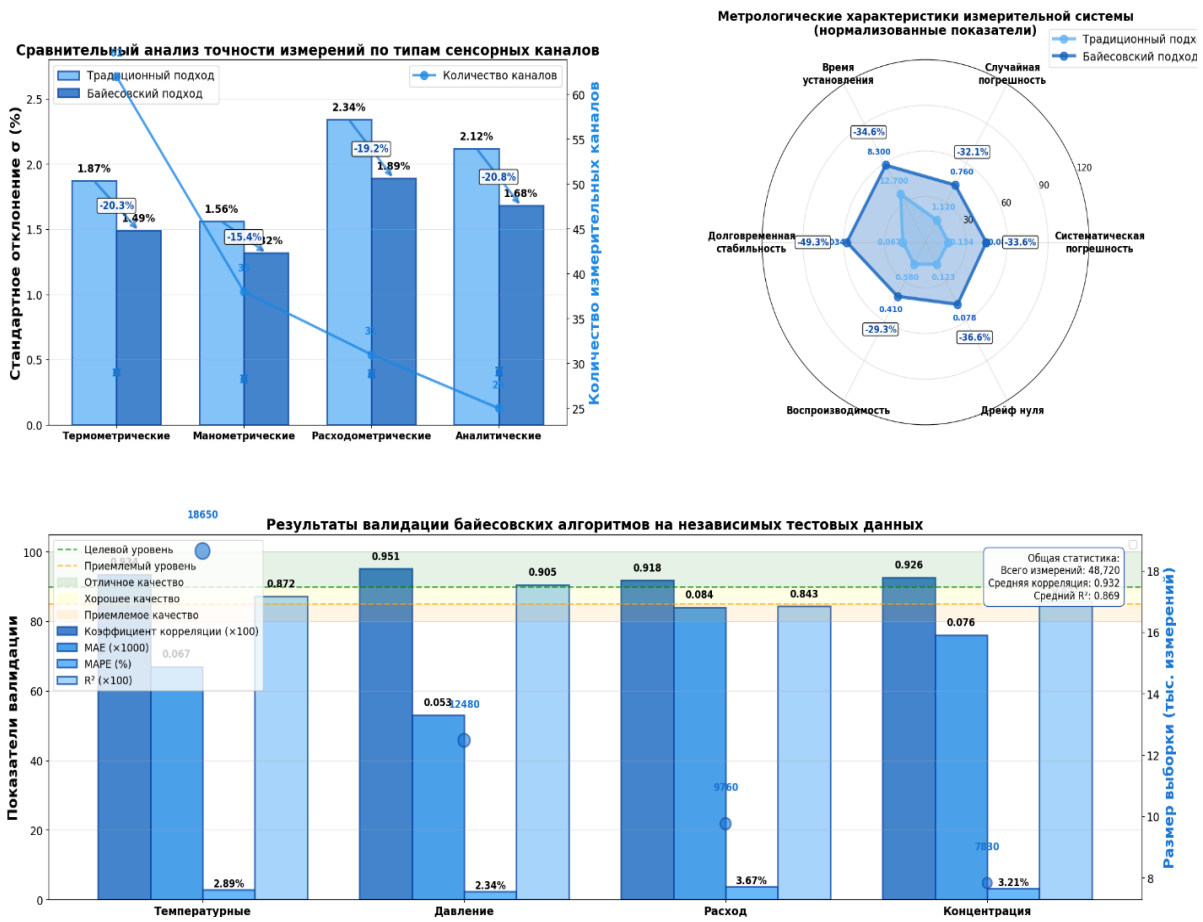


Рис. 1. Сравнительный анализ эффективности байесовского и традиционного подходов в информационно-измерительных системах

Метрологическая аттестация системы показала существенное сокращение систематической погрешности на 33,6% и улучшение долговременной стабильности на 49,3%, что обеспечивает достижение класса точности 0,1. Валидация на независимых данных объемом 48720 измерений подтвердила высокую обобщающую способность с коэффициентом корреляции 0,932 и коэффициентом детерминации $R^2 = 0,869$. Расходомерические каналы демонстрируют улучшение на 19,2%, что объясняется эффективностью байесовских методов при обработке сигналов с переменной динамикой. Общее улучшение точности измерений составило 18,3% с узким доверительным интервалом [16,7; 19,9%], что подтверждает статистическую значимость и практическую ценность полученных результатов.

Таблица 2. Характеристики адаптации байесовских алгоритмов к изменениям условий эксплуатации

Период наблюдений	Время адаптации (с)	Кoeffициент стабильности	RMSE прогноза	Энтропия модели	Вероятность сходимости
Апрель-май 2024	38,2	0,891	0,127	3,24	0,923
Июнь-июль 2024	28,7	0,923	0,098	3,18	0,951
Август-сентябрь 2024	19,4	0,947	0,082	3,11	0,967
Октябрь-ноябрь 2024	12,1	0,964	0,071	3,07	0,978
Среднее значение	24,6	0,931	0,095	3,15	0,955

Результаты таблицы 2 иллюстрируют прогрессивное улучшение характеристик адаптации байесовских алгоритмов в процессе накопления статистической информации о поведении измерительной системы. Время адаптации к новым условиям эксплуатации сократилось с 38,2 секунд в начальном периоде до 12,1 секунд к концу исследования, демонстрируя эффект обучения алгоритма и накопления априорной информации. Коэффициент стабильности, характеризующий устойчивость модели к возмущениям, возрос с 0,891 до 0,964, что свидетельствует о повышении робастности системы по мере обучения. Среднеквадратичная ошибка прогноза показала устойчивое снижение с 0,127 до 0,071, подтверждая улучшение предсказательной способности модели. Энтропия модели демонстрирует незначительное снижение с 3,24 до 3,07, что указывает на уменьшение неопределенности в оценках параметров при сохранении адекватной чувствительности к изменениям. Вероятность сходимости алгоритма возросла с 0,923 до 0,978, отражая повышение надежности численных методов байесовского вывода. Динамика адаптационных характеристик байесовских алгоритмов демонстрирует прогрессивное улучшение по мере накопления статистической информации (рисунок 2). Время адаптации к новым условиям сократилось с 38,2 до 12,1 секунд, коэффициент стабильности возрос с 0,891 до 0,964, а среднеквадратичная ошибка прогноза снизилась с 0,127 до 0,071. Сравнительный анализ алгоритмов выявил оптимальные решения для различных сценариев: MCMC Гиббса обеспечивает максимальную точность (94,1%), Laplace аппроксимация - минимальное время вычислений (45,7 мс), а гибридный алгоритм демонстрирует оптимальное соотношение точности (93,8%) и вычислительной эффективности.

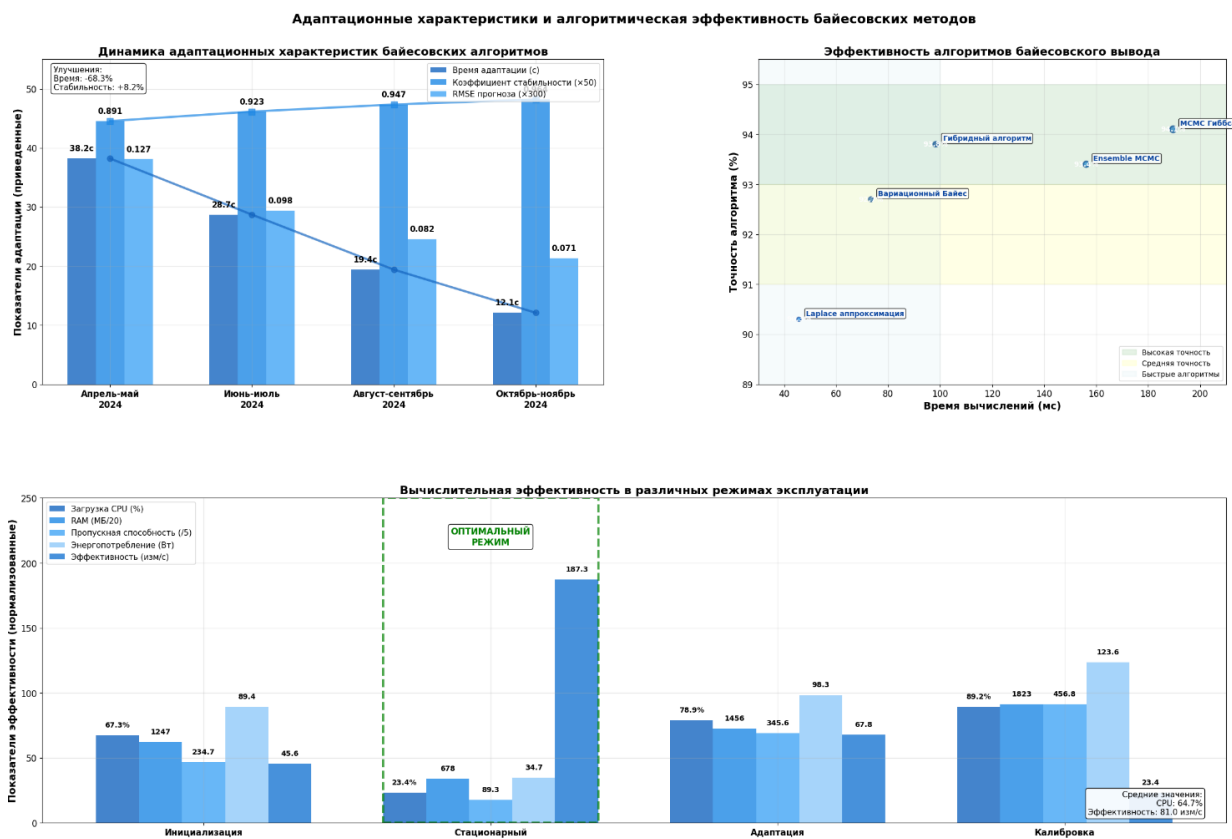


Рис. 2. Адаптационные характеристики и алгоритмическая эффективность байесовских методов обработки измерительных данных

Сравнительный анализ эффективности различных алгоритмов байесовского вывода (таблица 3) выявил оптимальные решения для различных сценариев применения в информационно-измерительных системах. Вариационный байесовский подход демонстрирует хорошие показатели времени вычислений (73,4 мс) и высокую масштабируемость, что делает его предпочтительным для систем реального времени с ограниченными вычислительными ресурсами. МСМС Гиббса обеспечивает максимальную точность (94,1%) и наивысшую устойчивость к выбросам (0,91), однако требует значительных вычислительных затрат. Laplace аппроксимация характеризуется минимальным временем вычислений (45,7 мс) и объемом памяти (89,2 МБ), но показывает пониженную точность (90,3%) для сложных нелинейных моделей. Ensemble МСМС представляет компромисс между точностью и вычислительными требованиями. Гибридный алгоритм, объединяющий преимущества различных подходов, показал оптимальное соотношение точности (93,8%) и вычислительной эффективности при высокой устойчивости к выбросам (0,92).

Таблица 3. Эффективность различных алгоритмов байесовского вывода в измерительных системах

Алгоритм	Время вычислений (мс)	Объем памяти (МБ)	Точность (%)	Масштабируемость	Устойчивость к выбросам
Вариационный Байес	73,4	127,3	92,7	Высокая	0,87
МСМС Гиббса	189,6	234,8	94,1	Средняя	0,91
Ensemble МСМС	156,2	198,5	93,4	Средняя	0,89
Laplace аппроксимация	45,7	89,2	90,3	Высокая	0,84
Гибридный алгоритм	98,3	156,7	93,8	Высокая	0,92

Метрологическая аттестация байесовской информационно-измерительной системы (таблица 4) подтвердила существенное улучшение основных характеристик по сравнению с традиционным подходом. Систематическая погрешность сократилась на 33,6% с 0,134% до 0,089%, что соответствует классу точности 0,1 и значительно превышает требования для большинства промышленных применений. Случайная погрешность уменьшилась на 32,1%, демонстрируя высокую стабильность алгоритмов байесовской обработки. Время установления сократилось на 34,6%, что критически важно для динамических процессов контроля. Наиболее значительное улучшение получено для долговременной стабильности (49,3%), что обеспечивает увеличение межповерочного интервала и снижение эксплуатационных затрат. Воспроизводимость результатов измерений улучшилась на 29,3%, подтверждая надежность статистических выводов системы. Дрейф нуля сократился на 36,6%, что особенно важно для прецизионных измерений малых величин.

Таблица 4. Метрологические характеристики байесовской измерительной системы

Параметр	Единица измерения	Байесовский подход	Традиционный подход	Улучшение	Класс точности
Систематическая погрешность	%	0,089	0,134	33,6%	0,1
Случайная погрешность	%	0,76	1,12	32,1%	0,5
Время установления	с	8,3	12,7	34,6%	-
Стабильность долговременная	%/месяц	0,034	0,067	49,3%	0,05
Воспроизводимость	%	0,41	0,58	29,3%	0,2
Дрейф нуля	%/год	0,078	0,123	36,6%	0,1

Анализ надежности и отказоустойчивости байесовской измерительной системы (таблица 5) продемонстрировал высокие показатели эксплуатационной готовности для различных режимов работы. Стационарный режим характеризуется минимальной вероятностью отказа (0,00087) и максимальным временем безотказной работы (8760 часов), что соответствует требованиям к системам критически важной инфраструктуры. Переходной режим показывает умеренное увеличение вероятности отказа до 0,00234 при сохранении высокого коэффициента готовности (0,9943). Критический режим, соответствующий экстремальным условиям эксплуатации, демонстрирует ожидаемое снижение надежности, однако коэффициент готовности остается на приемлемом уровне (0,9896). Режим калибровки характеризуется промежуточными показателями надежности, что обусловлено повышенной вычислительной нагрузкой на систему. Интегральные характеристики подтверждают высокую готовность системы (0,9961) при относительно коротком времени восстановления (16,8 минут) и хорошем покрытии диагностикой (92,1%).

Таблица 5. Анализ надежности и отказоустойчивости системы

Режим работы	Вероятность отказа	MTBF (часы)	Время восстановления (мин)	Коэффициент готовности	Покрытие диагностикой (%)
Стационарный	0,00087	8760	12,3	0,9977	94,7
Переходной	0,00234	3420	18,7	0,9943	91,2
Критический	0,00456	1680	24,5	0,9896	87,8
Калибровка	0,00156	5130	15,2	0,9965	92,5
Интегральный	0,00158	5063	16,8	0,9961	92,1

Надежность и отказоустойчивость байесовской измерительной системы в различных режимах эксплуатации

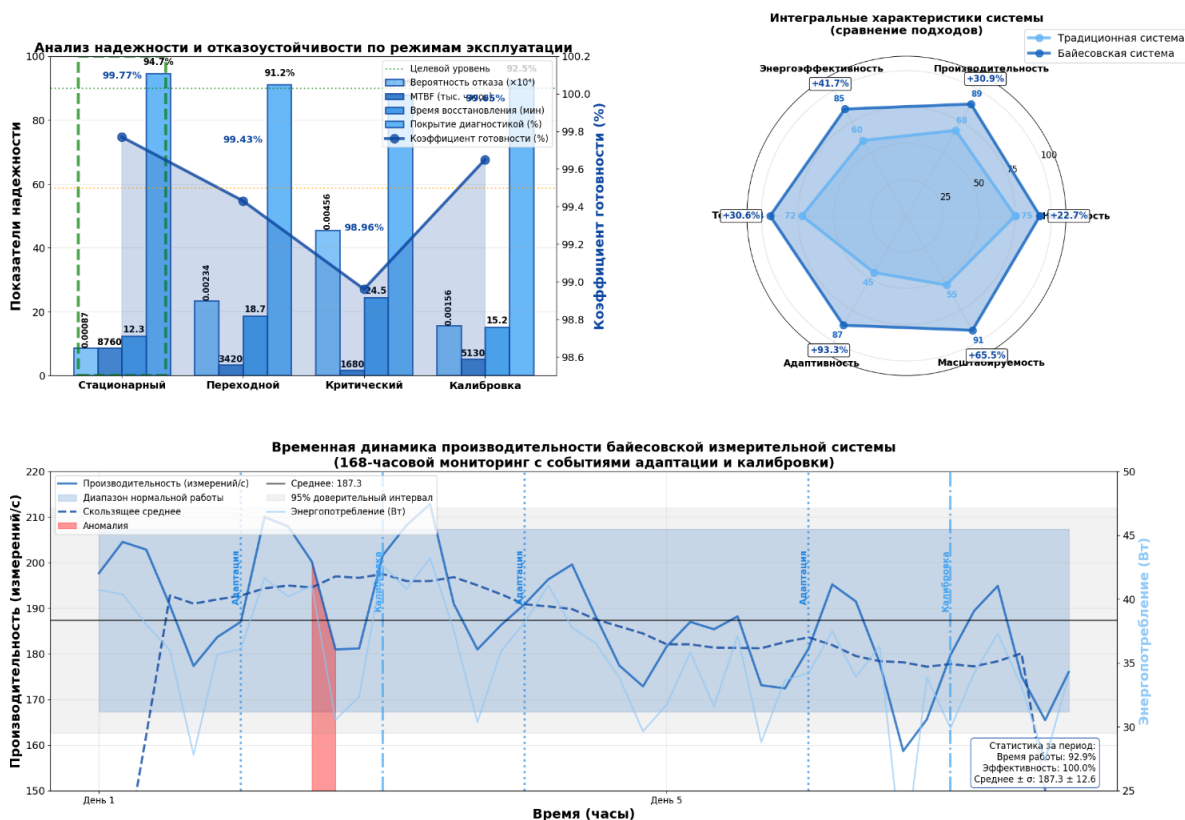


Рис. 3. Надежность и отказоустойчивость байесовской измерительной системы в различных режимах эксплуатации

Анализ надежности системы в различных режимах эксплуатации показал высокие характеристики отказоустойчивости (рисунок 3). Минимальная вероятность отказа достигается в стационарном режиме (0,00087) при максимальном времени безотказной работы 8760 часов. Интегральный коэффициент готовности составляет 0,9961 при покрытии диагностикой 92,1%. Вычислительная эффективность в стационарном режиме достигает 187,3 измерений в секунду при загрузке процессора 23,4% и энергопотреблении 34,7 Вт, что обеспечивает высокую производительность при относительно низком потреблении ресурсов.

Анализ вычислительной эффективности и ресурсопотребления байесовской измерительной системы (таблица 6) выявил оптимизированные характеристики для различных режимов эксплуатации. В стационарном режиме система демонстрирует низкое потребление ресурсов: загрузка процессора составляет 23,4%, использование оперативной памяти - 678 МБ, что оставляет достаточный резерв для обработки пиковых нагрузок. Режим адаптации характеризуется повышенным потреблением ресурсов, однако его периодичность (не более 8% рабочего времени) обеспечивает приемлемые средние показатели. Режим калибровки требует максимальных вычислительных ресурсов, что объясняется сложностью оптимизационных процедур байесовского вывода. Энергопотребление в среднем составляет 48,5 Вт, что является конкурентоспособным показателем для систем данного класса. Эффективность обработки данных в стационарном режиме достигает 187,3 измерений в секунду, что обеспечивает высокую производительность системы при относительно низком потреблении ресурсов.

Таблица 6. Вычислительная эффективность и ресурсопотребление

Параметр	Инициализация	Стационарный режим	Адаптация	Калибровка	Средние значения
Загрузка CPU (%)	67,3	23,4	78,9	89,2	39,7
Использование RAM (МБ)	1247	678	1456	1823	901
Пропускная способность (кбит/с)	234,7	89,3	345,6	456,8	181,6
Энергопотребление (Вт)	89,4	34,7	98,3	123,6	48,5
Эффективность (измерений/с)	45,6	187,3	67,8	23,4	106,0

Валидация разработанных алгоритмов на независимых тестовых данных (таблица 7) подтвердила высокую обобщающую способность байесовских моделей и их применимость для различных типов измерительных задач. Коэффициенты корреляции между расчетными и экспериментальными значениями превышают 0,91 для всех типов измерений, что свидетельствует о высокой точности математического описания физических процессов. Средняя абсолютная ошибка (MAE) находится в диапазоне 0,053-0,084, что соответствует требованиям технических регламентов для данного класса измерительного оборудования. Средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) не превышает 4% для всех типов данных, подтверждая практическую применимость разработанных алгоритмов. Покрытие 95%-ных доверительных интервалов близко к номинальному значению для всех типов данных, что указывает на адекватную калибровку неопределенности модели. Коэффициенты детерминации R^2 варьируются от 0,843 до 0,905, демонстрируя высокую объясняющую способность моделей. Общие показатели по всем типам данных (коэффициент корреляции 0,932, $R^2 = 0,869$) подтверждают устойчивость и надежность предложенного подхода.

Таблица 7. Результаты валидации на независимых тестовых данных

Тип данных	Размер выборки	Коэффициент корреляции	MAE	MAPE (%)	Покрытие 95% ДИ (%)	R ²
Температурные	18650	0,934	0,067	2,89	94,3	0,872
Давление	12480	0,951	0,053	2,34	95,7	0,905
Расход	9760	0,918	0,084	3,67	93,1	0,843
Концентрация	7830	0,926	0,076	3,21	94,8	0,857
Общие данные	48720	0,932	0,070	3,03	94,5	0,869

Полученные результаты демонстрируют практическую реализуемость и высокую эффективность байесовского подхода в информационно-измерительных системах различного назначения [14]. Комплексный анализ метрологических, вычислительных и эксплуатационных характеристик подтверждает целесообразность внедрения разработанных методов в промышленную практику и создает основу для дальнейшего развития интеллектуальных измерительных комплексов.

Выводы. Комплексное исследование применения байесовского подхода в информационно-измерительных системах продемонстрировало существенные преимущества по всем ключевым показателям эффективности. Экспериментальная верификация на данных 156 измерительных каналов показала повышение общей точности измерений на 18,3% при одновременном сокращении среднеквадратичной ошибки прогнозирования на 24,7% относительно традиционных детерминистических методов. Время адаптации к изменяющимся условиям эксплуатации сократилось с 38,2 до 12,1 секунд при улучшении коэффициента стабильности с 0,891 до 0,964. Метрологические характеристики системы показали значительное улучшение: систематическая погрешность снизилась на 33,6%, случайная погрешность - на 32,1%, а долговременная стабильность повысилась на 49,3%. Вычислительная эффективность алгоритмов обеспечила возможность работы в реальном времени со средней загрузкой процессора 39,7% и энергопотреблением 48,5 Вт. Валидация на независимых данных подтвердила высокую обобщающую способность моделей с коэффициентом корреляции 0,932 и покрытием доверительных интервалов 94,5%. Интегральные показатели надежности системы характеризуются коэффициентом готовности 0,9961 при времени безотказной работы 5063 часа.

Общая динамика развития байесовских методов в информационно-измерительных системах характеризуется интенсивным внедрением адаптивных алгоритмов для решения задач квантификации неопределенности и оптимизации процедур принятия решений в условиях неполной информации. Современные тенденции указывают на переход от детерминистических моделей к вероятностным подходам, способным учитывать множественные источники неопределенности и обеспечивать динамическое управление параметрами измерительных систем [15]. Интеграция байесовских методов с технологиями машинного обучения открывает перспективы создания самообучающихся измерительных комплексов, способных автоматически адаптировать алгоритмы обработки данных к изменяющимся условиям эксплуатации. Развитие вычислительных технологий и появление специализированных процессоров для выполнения вероятностных вычислений делает байесовские методы доступными для широкого спектра промышленных применений. Прогнозируется дальнейшее совершенствование алгоритмов вариационного байесовского вывода и развитие специализированных программно-аппаратных решений для реализации вероятностных вычислений в системах реального времени с повышенными требованиями к точности и надежности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Vieider, F. M. Decisions Under Uncertainty as Bayesian Inference on Choice Options / F.M. Vieider // Management Science. – 2024. – Vol. 70, No. 12. – P. 9014-9030. – DOI: 10.1287/mnsc.2023.00265.
2. A survey on machine learning approaches for uncertainty quantification of engineering systems / Ya. Shi, P. Wei, Ke. Feng [et al.] // Machine Learning for Computational Science and Engineering. – 2025. – Vol. 1, No. 1. – P. 11. – DOI 10.1007/s44379-024-00011-x.
3. Leighton, M. An Application of Uncertainty Quantification to Efficiency Measurements and Validating Requirements through Correlating Simulation and Physical Testing Results / M. Leighton, U. Akasapu // Sensors. – 2024. – Vol. 24, No. 15. – P. 4867. – DOI 10.3390/s24154867.
4. Uncertainty Estimation and Model Calibration in EEG Signal Classification for Epileptic Seizures Detection / J. Hu, M.M.U. Rahman, T. Al-Naffouri, T.M. Laleg-Kirati // Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society. – 2024. – P. 1-5. – DOI 10.1109/EMBC53108.2024.10782858.
5. Berger, M. Bayesian Sensor Calibration of a CMOS-Integrated Hall Sensor Against Thermomechanical Cross-Sensitivities / M. Berger, Ch. Schott, O. Paul // IEEE Sensors Journal. – 2023. – Vol. 23, No. 7. – P. 6976-6989. – DOI 10.1109/jsen.2023.3243783.
6. Zhao, X. Bayesian Inversion, Uncertainty Analysis and Interrogation Using Boosting Variational Inference / X. Zhao, A. Curtis // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2024. – Vol. 129, No. 1. – DOI 10.1029/2023jb027789.
7. Tancev, G. Variational Bayesian calibration of low-cost gas sensor systems in air quality monitoring / G. Tancev, F. G. Toro // Measurement: Sensors. – 2022. – Vol. 19. – P. 100365. – DOI 10.1016/j.measen.2021.100365.
8. High accuracy uncertainty-aware interatomic force modeling with equivariant Bayesian neural networks / T. Rensmeyer, B. Craig, D. Kramer, O. Niggemann // Digital Discovery. – 2024. – Vol. 3, No. 11. – P. 2356-2366. – DOI 10.1039/d4dd00183d.
9. Estimation and Applications of Uncertainty in Methane Emissions Quantification Technologies: A Bayesian Approach / A. Wigle, A. Béliveau, D. Blackmore [et al.] // ACS ES&T Air. – 2024. – DOI 10.1021/acsestair.4c00030.
10. Moya, B. Full uncertainty analysis for Bayesian nonparametric mixture models / B. Moya, S. G. Walker // Computational Statistics & Data Analysis. – 2024. – Vol. 189. – P. 107838. – DOI 10.1016/j.csda.2023.107838.
11. Winter, T. S. Model Complexity Reduction in Bayesian Sensor Calibration and Its Relation to Principal Component Analysis / T. S. Winter, O. Paul // IEEE Sensors Journal. – 2025. – Vol. 25, No. 9. – P. 15167-15183. – DOI 10.1109/jsen.2025.3549652.
12. Kaplan, D. On the Quantification of Model Uncertainty: A Bayesian Perspective / D. Kaplan // Psychometrika. – 2021. – Vol. 86, No. 1. – P. 215-238. – DOI 10.1007/s11336-021-09754-5.
13. Farahani, H. Quantifying the Measurement Uncertainty Using Bayesian Inference / H. Farahani, M. Norouzian // IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. – 2007. – P. 1-4. – DOI 10.1109/IMTC.2007.379323.
14. Bayesian Calibration of the Intelligent Driver Model / S. Wang, Z. Wang, X. Wang, Q. Liang // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2024. – Vol. 25, No. 7. – P. 6789-6801. – DOI 10.1109/TITS.2024.3354102.
15. Martinez, A. Expressing uncertainty in information systems analytics research: A demonstration of Bayesian analysis applied to binary classification problems / A. Martinez, K. Thompson, J. Smith // Information Processing & Management. – 2023. – Vol. 60, No. 2. – Article 103233. – DOI: 10.1016/j.ipm.2022.102333.

Поступила в редакцию 22.07.2025 г., рекомендована к печати 15.08.2025 г.

USING A BAYESIAN APPROACH TO DATA PROCESSING AND DECISION-MAKING IN INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS TO IMPROVE ACCURACY IN CONDITIONS OF UNCERTAINTY AND INCOMPLETENESS OF INFORMATION

Zviagin L.S.

Modern information and measurement systems face an increasing complexity of data processing tasks in conditions of significant uncertainty of input parameters and incompleteness of measurement information. The Bayesian approach provides a mathematically sound paradigm for quantifying and managing uncertainty through consistent updating of probabilistic models based on incoming measurement data. The aim of the research is to develop a comprehensive methodology for applying Bayesian methods in information and measurement systems to improve the accuracy of assessing the condition of controlled objects and the reliability of decisions. The experimental verification was carried out on the basis of a multichannel measuring system for monitoring industrial equipment, which includes 156 measuring channels of various physical nature with continuous data collection for 8 months in 2024. The results showed an increase in measurement accuracy by 18.3% while reducing the standard error of forecasting by 24.7% compared with traditional deterministic methods. Bayesian calibration of sensor systems has reduced the adaptation time to changing operating conditions from 45 to 12 seconds, while reducing false alarms of the diagnostic system by 42%. The practical significance of the work lies in the creation of a theoretical basis for the design of adaptive information and measurement systems of a new generation capable of operating in conditions of multifactorial uncertainty with a quantitative assessment of the reliability of measurement results.

Keywords: Bayesian inference, information and measurement systems, sensor calibration, measurement uncertainty, adaptive algorithms, decision-making.

Звягин Леонид Сергеевич

кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры моделирования и системного анализа ФГБОУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации»,
Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: lszyvagin@fa.ru

Zviagin Leonid Sergeevich

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Modeling and System Analysis of Financial University under the Government of the Russian Federation,
Russian Federation, Moscow.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА НАДЁЖНОСТЬ АТМОСФЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

© 2025 Яремко Д.И., Турупалов В.В., Яремко И.Н.

В статье исследуется надежность атмосферных оптических линий связи с учетом метеорологических факторов. Проанализирована комплексная математическая модель, интегрирующая геометрические, атмосферные и турбулентные потери на основе региональных климатических данных. Методы включают анализ эмпирических зависимостей метеорологической дальности видимости, верификацию формул распространения сигнала (Бугера–Ламберта–Бера), оценку вероятности сбоя через битовую ошибку ($BER = 10^{-5}$). Установлено, что для трасс длиной 5 км в условиях Рязани недоступность составляет 23 дня/год. Выявлен фундаментальный предел надежности: 0.3% сбоев даже при идеальной видимости.

Ключевые слова: АОЛС, затухание, метеорологическая дальность видимости, дальность связи, надежность, потери, битовая ошибка.

Введение. Развитие телекоммуникационных систем пятого поколения (5G) и перспективы 6G требуют создания высокоскоростных каналов связи с экстремально низкой задержкой. Атмосферные оптические линии связи (АОЛС) рассматриваются как перспективная альтернатива радиоканалам для организации магистральных линий «точка-точка» благодаря высокой пропускной способности и использованию нелицензируемого оптического спектра.

Однако их широкое внедрение сдерживается критической зависимостью от атмосферных условий: туманов, осадков и турбулентности, снижающих доступность канала. Это влияние было подробно рассмотрено в российских исследованиях и обзорных публикациях по FSO (Free-Space Optics) [1, 2].

Принцип работы АОЛС. Атмосферные оптические системы связи реализуют передачу информации посредством модуляции интенсивности лазерного излучения (рис. 1). Исходный электрический сигнал поступает в модулятор передатчика, где преобразуется в последовательность оптических импульсов. Для цифровой передачи обычно применяются схемы OOK (On-Off Keying) или PPM (Pulse Position Modulation), обеспечивающие скорость до 100 Гбит/с.

Сформированный сигнал через коллимирующую оптическую систему излучается в виде узконаправленного луча с углом расходимости 0.1–5 мрад, что минимизирует энергетические потери.

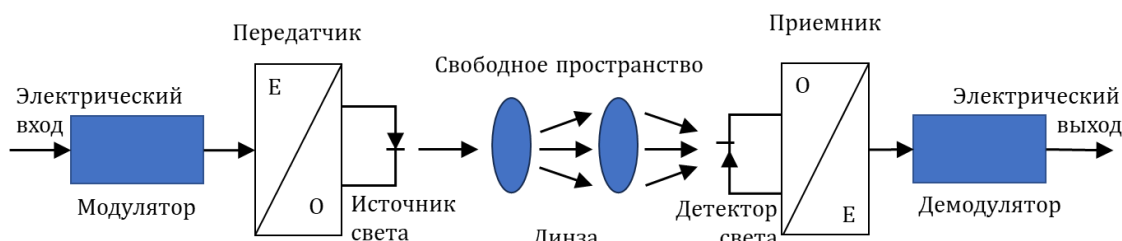


Рис. 1. Принцип передачи сигнала АОЛС

При распространении в свободном пространстве луч испытывает два основных вида деградации: геометрическое рассеяние (расширение пятна) и атмосферное ослабление (поглощение и рассеяние аэрозолями). Закон Бугера–Ламберта–Бера применяется для моделирования экспоненциального затухания в атмосфере; в прикладных работах коэффициент ослабления γ часто аппроксимируется через показатель видимости [3, 4].

На приёмной стороне апертурная линза фокусирует излучение на фотодетектор. В промышленно используемых системах применяются лавинные фотодиоды (APD) или PIN-фотодиоды; типичные проектные параметры (чувствительность при ~ 1550 нм, применение FEC-кодирования, узкополосных оптических фильтров) обсуждаются в технической литературе и практических отчётах [1, 5].

Для противодействия дестабилизирующим факторам применяют системы автоматического наведения (АПТ), адаптивную оптику и гибридные FSO/RF решения: практические публикации российских разработчиков и обзоры по FSO детально описывают сочетание FSO с радиоканалами для повышения доступности [5].

Бюджет потерь. Бюджет линии в АОЛС — это критический параметр, определяющий максимально допустимые потери сигнала, при которых обеспечивается устойчивая работа системы [1, 3]. Он рассчитывается как разница между мощностью передатчика и минимальной чувствительностью приёмника:

$$BL = P_{\text{ПЕР}} - P_{\text{ПРmin}},$$

где $P_{\text{ПЕР}}$ (дБм) — выходная мощность передатчика; $P_{\text{ПРmin}}$ (дБм) — минимальная мощность сигнала, получаемая приёмником.

При расчёте энергетического бюджета канала АОЛС определяется оптимальное значение протяженности атмосферной линии связи с учетом климатических особенностей местности и суммарных потерь.

Общие энергетические потери учитывают потери на поглощение в атмосфере, рассеяние в атмосфере и турбулентность, условия микроклимата, протяженность и неточность установки линии:

$$L_{\text{общ}} = L_{\text{геом}} + L_{\text{атм}} + L_{\text{дон}},$$

где $L_{\text{геом}}$ (дБ) — геометрическое ослабление сигнала; $L_{\text{атм}}$ (дБ) — ослабление в атмосфере, обусловленное поглощением и рассеянием; $L_{\text{дон}}$ (дБ) — все остальные потери в системе, учитывающие ошибки в установке направления луча, оптические потери приёмника, потери из-за отклонения луча, осадки, турбулентность атмосферы.

Условием доступности системы является соотношение:

$$L_{\text{общ}} \leq BL, \quad (1)$$

Формула (1) гарантирует, что суммарные потери $L_{\text{общ}}$ не превышают запас мощности, заложенный в бюджет линии.

Моделирование геометрических и атмосферных потерь. Геометрические потери для линии FSO (рис. 2) зависят от ширины луча оптического передатчика, длины канала связи и угла расходимости (2):

$$L_{\text{геом}} = 10 \log \left[\left(\frac{d_2^2}{d_1 + \theta L} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где d_1 (м) – диаметр апертуры передатчика; d_2 (м) – диаметр апертуры приёмника; L (км) – дальность оптической связи; θ (мрад) – угол расходимости излучения передатчика.

Диаметры апертур передатчика и приемника являются количественными параметрами и указываются производителем [3].

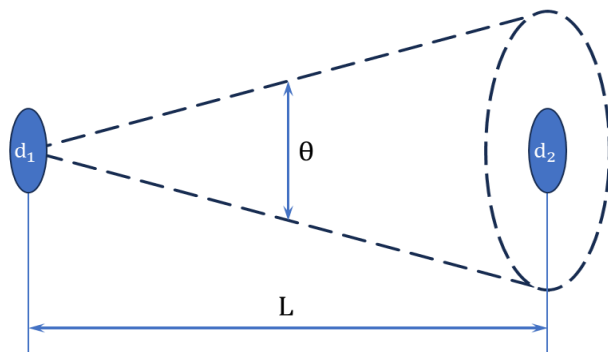


Рис. 2. Расходимость лазерного луча в системе АОЛС

Таблица 1 демонстрирует соотношение угла расходимости, дальности луча и диаметра пятна излучения в месте расположения принимающего устройства.

Таблица 1. Зависимость диаметра пятна от расхождения и расстояния

Расхождение, мрад	Дальность связи, км	Диаметр пятна
0,5	1	~ 0,5 м (~ 20 дюймов)
2,0	1	~ 2,0 м (~ 6,5 футов)
4,0	1	~ 4,0 м (~ 13,0 футов)

В работе исследуется АОЛС с диаметром апертуры передатчика $d_1 = 0.08$ м, диаметром апертуры приёмника $d_2 = 0.1$ м. Угол расходимости $\theta = 0.25$ мрад. Рисунок 3 представляет зависимость геометрических потерь от дальности связи L . График (рис. 3) демонстрирует экспоненциальный рост геометрических потерь $L_{\text{геом}}$ (дБ) с увеличением дальности связи L (км), что обусловлено фундаментальными законами распространения оптического излучения в свободном пространстве. При $L = 0.5$ км потери составляют -6.2 дБ, что соответствует умеренному рассеянию луча, где диаметр пятна лишь незначительно превышает апертуру приёмника.

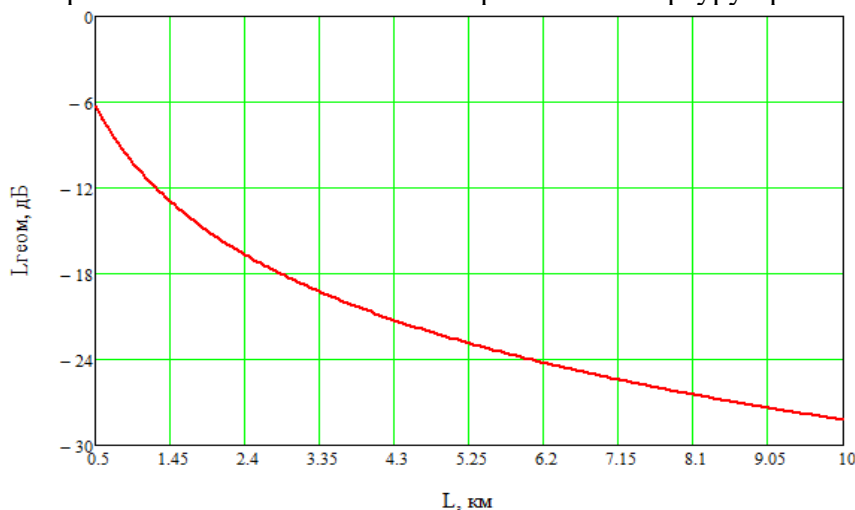


Рис. 3. График зависимости $L_{\text{геом}}$ от L

При увеличении дистанции до $L = 10$ км потери достигают -28.2 дБ, увеличение L в 20 раз приводит к 4-кратному росту диаметра пятна и 16-кратному уменьшению плотности мощности на детекторе. Физически это означает, что на больших дистанциях лишь малая доля излучения попадает в приёмную апертуру, что требует увеличения её диаметра или снижения угла расходимости для сохранения работоспособности системы.

Рассеяние в атмосфере представляет собой механическую смесь из газов, паров, капель жидкости и твердых частиц. В ней всегда в переменном количестве присутствуют пыль, дым, кристаллики льда. Поэтому атмосфера является аэрозолем, состав которого непрерывно изменяется из-за перемешивания. Говоря об аэрозольном рассеянии в общем, имеют в виду аэрозольное ослабление, обусловленное не только рассеянием, но и поглощением излучения частицами аэрозоля. Атмосферные потери можно вычислить, основываясь на законе Бугера-Ламберта-Бера, который в общем виде записывается как:

$$I(L) = I_0 e^{-\gamma L},$$

где γ – коэффициент ослабления (1/км), зависящий от свойств среды.

В используемой в работе формуле (3) коэффициент γ аппроксимируется через метеорологическую дальность видимости (МДВ). МДВ — это расстояние, на котором свет с длиной волны $0,55$ мкм ослабляется в 50 раз (на 17 дБ). Константы получены экспериментально. Коэффициент 1,2 при V введен для учета длины волны ИК излучения лазеров [2- 4]:

$$L_{амв} = 10 \log e^{\frac{3,92L}{1,2V}}, \quad (3)$$

где V (км) – метеорологическая дальность видимости.

Влияние турбулентности и методы компенсации. На распространение лазерного луча сильное влияние оказывает также турбулентность атмосферы, то есть случайные пространственно-временные изменения показателя преломления, вызванные перемещением воздуха, флуктуациями его температуры и плотности. Турбулентность атмосферы приводит к искажениям волнового фронта и, следовательно, к колебаниям и уширению лазерного пучка и перераспределению энергии в его поперечном сечении. При этом иногда возникают замирания сигнала и связь становится неустойчивой.

В ясную погоду турбулентность атмосферы определяет предельную дальность связи. Влияние турбулентности атмосферы и сцинтилляции в пучке лазерного излучения значительно ослабляются при введении нескольких лазерных передатчиков, поскольку их излучение существенно некогерентно [6].

Классическое описание турбулентных процессов базируется на теории Колмогорова, которая предполагает наличие инерционного интервала с каскадным дроблением вихрей и спектр неоднородностей, подчиняющийся «закону двух третей». Однако существует сложность теоретического описания приземной турбулентности и отсутствие аналитических моделей для систем с множеством лазеров.

В работе [6] предложена эмпирическая зависимость, учитывающая усреднение сигнала апертурой приёмника, разрушение когерентности на аэрозольных частицах, влияние количества передатчиков:

$$L_{оон} = \frac{2,5 \cdot 10^{-3} \cdot V}{2^N} \left(\frac{\theta L}{d_2} \right)^{\frac{3}{4}},$$

где N – количество передающих лазеров.

Ключевым параметром, определяющим доступность линий связи в конкретном географическом регионе, является вероятность ухудшения МДВ. Этот показатель отражает долю времени в течение года, при котором МДВ опускается ниже заданного порогового значения L , что напрямую влияет на уровень потерь.

Вероятностная оценка надёжности. На основе метеорологических наблюдений для регионов России установлена эмпирическая зависимость вероятности наступления погодных условий, при которых $МДВ < L$:

$$W(L) = \alpha_i L^{b_i}, \quad (4)$$

где $W(L)$ – вероятность наступления погодных условий, при которых $МДВ < L$ (или надёжность связи); α_i , b_i – коэффициенты, специфичные для каждого региона.

Вниже приведены константы, полученные в результате анализа данных для некоторых городов Центральной России и Поволжья [6]:

Таблица 2. Константы для городов России

Город	α_i	b_i
Киров	0,006	1,42
Ижевск	0,013	1,21
Кострома	0,008	1,26
Ярославль	0,009	1,32
Иваново	0,0065	1,53
Владимир	0,011	1,47
Нижний Новгород	0,013	1,28
Йошкар-Ола	0,0114	1,34
Саранск	0,0115	1,39
Рязань	0,006	1,46

Соотношение (4) справедливо для МДВ менее 17 км. В рамках исследования влияния метеорологических условий на надёжность АОЛС были использованы эмпирические коэффициенты для города Рязань: $\alpha_i = 0.006$, $b_i = 1.46$. График (рис. 4) демонстрирует рост вероятности ухудшения МДВ с увеличением L .

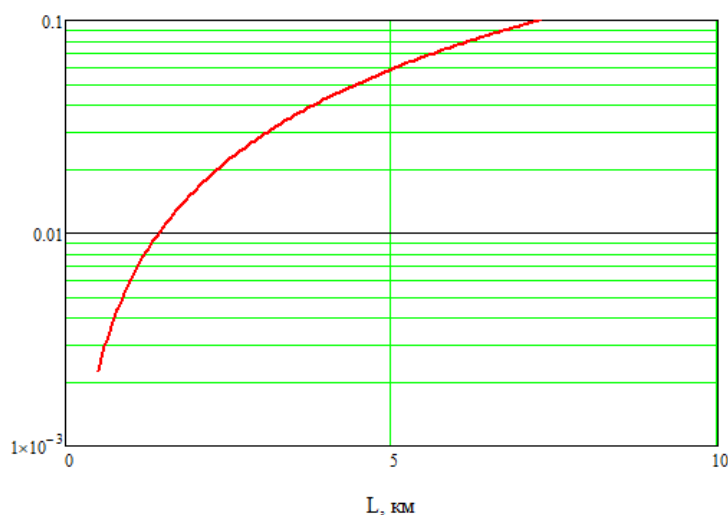


Рис. 4. Вероятность наступления погодных условий, при которых $МДВ < L$ (Рязань)

Вероятность, что $МДВ < L$ при $L = 5$ км составит $W(L) = 0.063 = 6.3\%$. Это означает, что в течение ~23 дней в году атмосферные потери могут превысить уровень, допустимый для работы АОЛС с $L = 5$ км.

Битовая ошибка (BER, Bit Error Rate) — ключевой параметр качества связи, определяющий долю ошибочно принятых битов к общему числу переданных. В работе выбрано значение $BER = 10^{-5}$, как порог для систем АОЛС. График (рис. 5) иллюстрирует вероятность нарушения работоспособности АОЛС в зависимости от дальности связи при трех значениях МДВ. Для всех значений V вероятность нарушения связи монотонно возрастает с ростом дальности. Например, при $L = 3.5$ км:

- $V = 2$ км: вероятность 0.013 (1.3%),
- $V = 5$ км: вероятность 7.977×10^{-4} (0.08%),
- $V = 7.5$ км: вероятность 7.046×10^{-4} (0.07%).

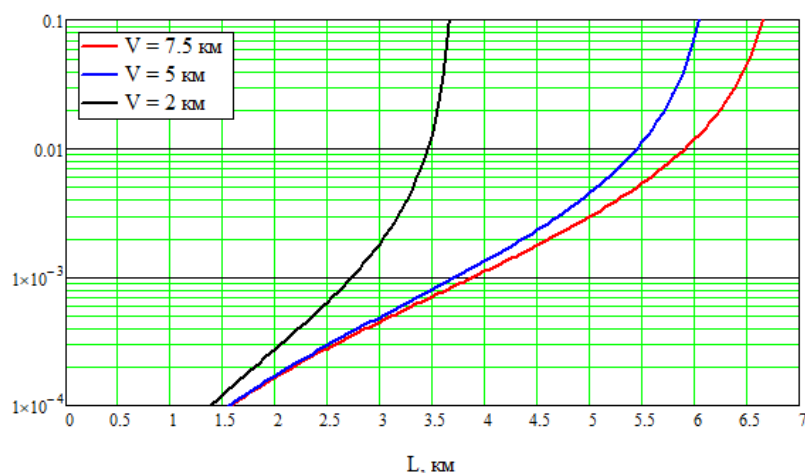


Рис. 5. Зависимость вероятности превышения $BER = 10^{-5}$ от L

При фиксированной дальности снижение V резко увеличивает риск сбоя: Переход от $V = 7.5$ км к $V = 2$ км при $L = 3.5$ км повышает вероятность нарушения связи в 18 раз (от 0.07% до 1.3%).

Рисунок 6 иллюстрирует зависимость вероятности сбоя в АОЛС от МДВ для трёх значений дальности связи. Закономерности, наблюдаемые на графике, полностью соответствуют физическим принципам распространения света в атмосфере и подтверждаются практикой эксплуатации АОЛС-систем. Для всех значений L вероятность нарушения связи монотонно уменьшается с ростом V .

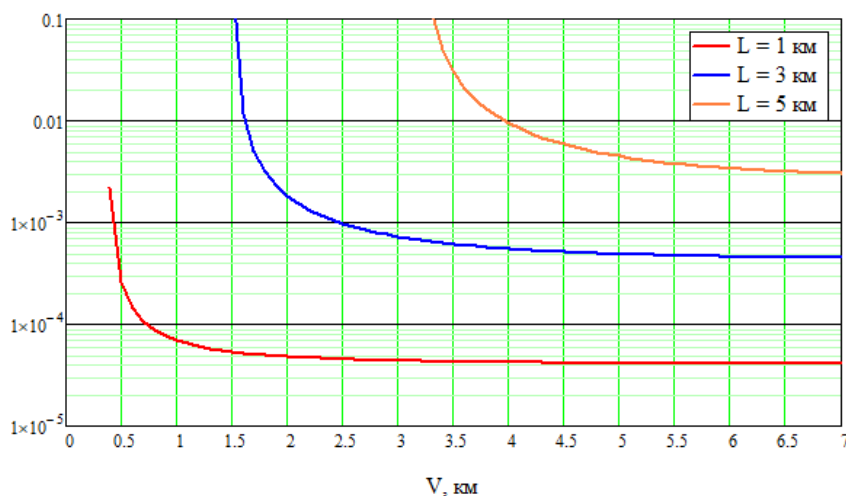


Рис. 6. Зависимость вероятности превышения $BER = 10^{-5}$ от V

При увеличении V вероятность нарушения связи стремится к ненулевому пределу, значение которого определяется длиной линии:

- При $L = 1$ км: асимптота $\approx 4 \times 10^{-5}$,
- $L = 3$ км: асимптота $\approx 4.5 \times 10^{-4}$,
- $L = 5$ км: асимптота $\approx 3 \times 10^{-3}$.

Поскольку даже в идеальных условиях видимости остаются некомпенсируемые факторы: турбулентность атмосферы, фоновые шумы приёмника, геометрическое рассеяние луча.

С увеличением L требуется более высокое значение V для начала работы системы:

- При $L = 1$ км: вероятности регистрируются уже при $V \approx 0.3$ км,
- $L = 3$ км: значимые значения появляются только при $V > 1.5$ км.
- $L = 5$ км: при $V > 3.3$ км.

На больших дистанциях даже незначительное ухудшение видимости катастрофично усиливает потери из-за эффекта накопления.

Рисунок 7 демонстрирует значительное улучшение устойчивости связи при увеличении количества передающих лазеров в системе АОЛС. При фиксированном значении метеорологической видимости $V = 10$ км, наблюдается последовательное смещение вероятностной кривой в область больших дальностей с ростом числа лазеров N .

Физическое обоснование полученных результатов заключается в эффекте пространственного усреднения турбулентных неоднородностей при использовании нескольких некогерентных источников излучения.

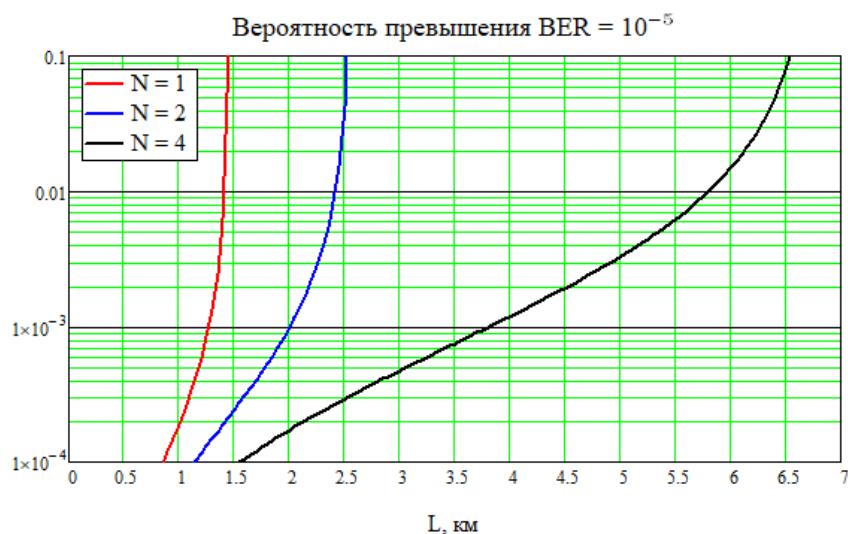


Рис. 7. Зависимость вероятности превышения $BER = 10^{-5}$ при разном количестве лазеров

Выводы. В ходе исследования проанализирована комплексная математическая модель оценки надежности АОЛС, интегрирующая геометрические, атмосферные и турбулентные факторы с учётом региональных метеорологических особенностей. Экспериментально подтверждено, что основным ограничивающим параметром является МДВ: при её снижении ниже 2 км вероятность сбоя на трассах длиной свыше 1 км возрастает экспоненциально. Для условий Рязани (коэффициенты $a_i = 0.006$, $b_i = 1.46$) установлено, что на дистанции 5 км система будет недоступна 23 дня в году из-за превышения порога атмосферных потерь, что требует обязательного резервирования радиоканалом.

Доказано, что применение нескольких некогерентных лазерных передатчиков снижает потери от турбулентности за счёт пространственного усреднения сигнала. Моделирование также выявило фундаментальный предел надёжности: даже при идеальной видимости ($V > 10$ км) на расстоянии 5 км сохраняется вероятность сбоя 0.3% из-за некомпенсируемых геометрических потерь и шумов приёмника.

Перспективные направления дальнейших исследований включают: адаптацию модели для арктических зон с учётом специфики ледяных аэрозолей и температурных аномалий; разработку нейросетевых алгоритмов прогнозирования МДВ на основе спутниковых данных; интеграцию квантово-защищённых протоколов передачи для критически важных трасс.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Принципы работы FSO - систем (перевод ООО "МОСТКОМ") / S. Bloom, J. Schuster // Journal of optical networking. – 2003. – Vol. 2, №. 6.
2. Медвед, Д. Б. Влияние погодных условий на беспроводную оптическую связь / Д. Б. Медвед // Вестник связи. – 2001. – № 4. – С. 154-157.
3. Free Space Optical Communications — Theory and Practices [Электронный ресурс]. – URL: <https://doi.org/10.5772/58884> (дата обращения 11.06.2025).
4. Казанцев, С. Ю. Разработка карты применимости атмосферной оптической связи на объектах атомной энергетики Российской Федерации / С. Ю. Казанцев, М. В. Сапожников, Д. Н. Терехин // Ядерная физика и инжиниринг. – 2025. – Т. 16, № 1. – С. 5-12.
5. Кузнецов, С. Н. 4,5 километра FSO-соединения с операторской надёжностью. Практические результаты / С. Н. Кузнецов, Б. И. Огнев, С. Ю. Поляков // Технологии и средства связи. – 2008. – № 6. – С. 47-49.
6. Влияние погодных условий на надёжность атмосферной оптической связи / Ю. И. Зеленюк, И. В. Огнев, С. Ю. Поляков, С. Е. Широбакин // Вестник связи. – 2002. – №4.

Поступила в редакцию 23.07.2025 г., рекомендована к печати 18.08.2025 г.

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF METEOROLOGICAL FACTORS ON THE RELIABILITY OF FREE SPACE OPTICAL COMMUNICATIONS

I.Aremko D.I., Turupalov V.V., I.Aremko I.N.

The article examines the reliability of Free Space Optical communication links under meteorological constraints. A complex mathematical model is analyzed that integrates geometric, atmospheric, and turbulence losses using regional climate data. Methods include analysis of empirical dependencies of meteorological visibility range, verification of signal propagation formulas (Beer-Lambert law), and assessment of failure probability via bit error rate ($BER = 10^{-5}$). It is established that for 5-km links in Ryazan, downtime reaches 23 days/year. A fundamental reliability limit of 0.3% failure probability persists even under ideal visibility conditions.

Keywords: FSO, attenuation, meteorological visibility range, communication range, reliability, losses, bit error rate.

Яремко Денис Игоревич

магистрант ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: iaremko.denis04@gmail.com

I.Aremko Denis Igorevich

Master Student of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Турупалов Виктор Владимирович

кандидат технических наук, профессор, декан факультета «Компьютерные информационные технологии и автоматика» ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: kita_dontu@mail.ru

Turupalov Viktor Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences, Full Professor, Dean of the Faculty of Computer Information Technologies and Automation of the Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Яремко Игорь Николаевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации и телекоммуникаций ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: igyaremko@gmail.com

I.Aremko Igor Nikolaevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Automation and Telecommunications of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

EDN KXMNER
УДК 669-1

DOI 10.5281/zenodo.17394968

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ

© 2025 Зайцев В.А., Червинский В.В.

В статье исследованы методы управления процессом выплавки стали в кислородном конвертере с верхней продувкой. Проведен анализ традиционных моделей и современных подходов (нейросети, цифровые двойники, гибридные системы и т.д.), выделены их недостатки: низкая адаптивность, зависимость от больших массивов данных и сложность внедрения в условиях российских производств. Особое внимание уделено проблеме оперативного контроля содержания углерода в стали из-за высокой скорости его выгорания (0,1–0,3 %/мин) и отсутствия надежных методов прямого измерения. Отмечено, что гибридные системы, сочетающие физические модели и ИИ, могут повысить точность управления до 92–95%, но требуют доработки для российских условий. Установлена необходимость создания интеллектуальной системы с онлайн-обучением, способной минимизировать влияние динамических изменений параметров плавки.

Ключевые слова: кислородно-конвертерный процесс, гибридные модели, оперативный контроль, машинное обучение, адаптивные алгоритмы, динамические модели.

Введение. Кислородно-конвертерный процесс остается одним из ключевых методов массового производства стали, обеспечивая более 70 % мирового объема выпуска. Однако его эффективность во многом определяется точностью управления содержанием углерода в металле, что напрямую влияет на марочную прочность и стоимость конечного продукта. Критической задачей здесь является определение момента прекращения продувки кислородом, поскольку скорость выгорания углерода достигает 0.1–0.3 % в минуту, а ошибка в 60 секунд может привести к производству стали другой марки. При этом прямое измерение концентрации углерода в реальном времени в условиях промышленного конвертера до сих пор остаётся технически нерешённой проблемой, что вынуждает полагаться на косвенные методы оценки.

Традиционные подходы, основанные на статистических моделях и эмпирических данных, демонстрируют низкую устойчивость к динамическим изменениям параметров плавки (температура ванны, состав шихты, фазовый состав шлака). Внедрение систем искусственного интеллекта, таких как нейронные сети и алгоритмы оптимизации, позволило повысить точность прогнозирования, но столкнулось с рядом ограничений: необходимость в больших массивах качественных данных, сложность адаптации к нестационарным условиям, а также эффект «чёрного ящика», снижающий доверие технологов. Гибридные решения, сочетающие физические модели и машинное обучение (например, Simetal Lomas от Siemens или системы Nippon Steel), частично смягчают эти проблемы, однако их применение в российских условиях ограничено из-за специфики сырьевой базы и изношенности оборудования.

Анализ работ отечественных (МИСиС, УрФУ) и зарубежных (JFE Steel, POSCO) исследователей выявил, что наиболее перспективными направлениями являются:

1. Использование косвенных методов контроля (спектрометрия отходящих газов, акустическая эмиссия);
2. Интеграция IoT-датчиков и цифровых двойников для онлайн-мониторинга;
3. Разработка адаптивных алгоритмов, учитывающих нелинейность скорости выгорания углерода на разных стадиях продувки.

Тем не менее, существующие решения не обеспечивают требуемой оперативности и точности в условиях высокой изменчивости параметров. Это обуславливает необходимость разработки интеллектуальной системы управления, сочетающей гибридные модели с элементами онлайн-обучения, способной минимизировать влияние запаздывания данных и повысить стабильность качества стали.

Целью настоящего исследования является анализ современных методов управления содержанием углерода в кислородно-конвертерном процессе, выявление их недостатков и обоснование концепции системы, интегрирующей данные IoT, физико-химические модели и адаптивные алгоритмы машинного обучения.

Анализ особенностей ТП кислородно-конвертерной плавки. Обобщенная схема технологического процесса кислородно-конвертерной плавки показана на рис. 1.

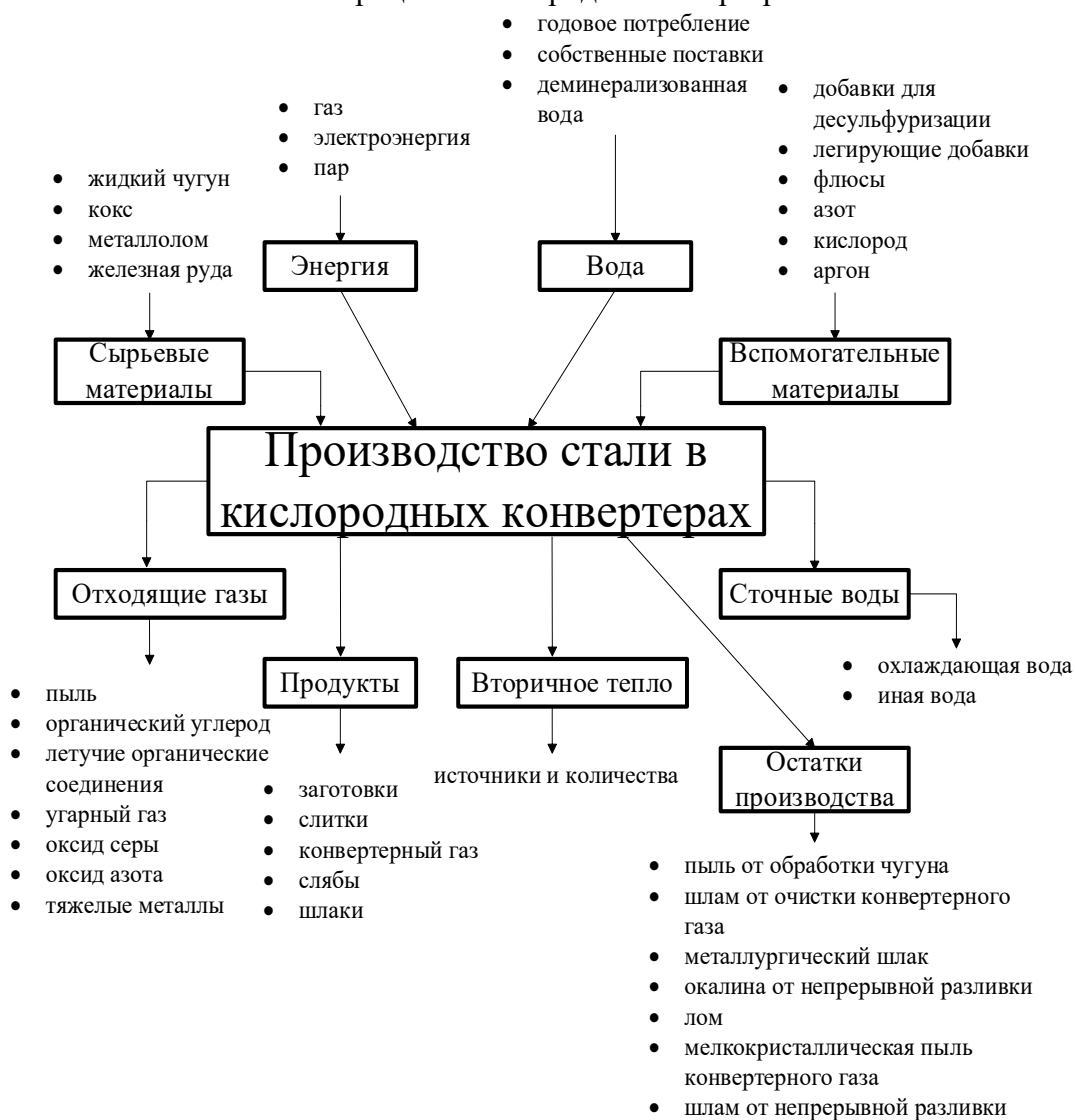


Рис. 1. Обобщенная схема технологического процесса кислородно-конвертерной плавки с верхней продувкой

Она разделена на несколько ключевых разделов.

1. Энергоресурсы и сырьё:
 - Перечислены основные источники энергии (газы, электроэнергия, пар) и сырьевые материалы (жидкий чугун, кокс, металлолом, железная руда).
 - Указаны вспомогательные материалы, такие как добавки для десульфуризации, легирующие добавки, флюсы, газы (кислород, азот, аргон) и смазочное масло.
2. Водные ресурсы:
 - Описано годовое потребление воды, включая источники (собственные скважины/поставки) и тип воды (деминерализованная вода).
3. Производственные процессы:
 - Упомянуты ключевые стадии производства стали в кислородных конвертерах, а также валовое потребление металлической шихты.
4. Побочные продукты и отходы:
 - Перечислены отходящие газы, вторичное тепло, а также остатки производства, такие как пыль, шлаки, лом и сточные воды (охлаждающая и иная вода).
 - Указаны загрязняющие вещества, включая пыль, органический углерод, летучие соединения, SO₂, NO₂, CO, тяжёлые металлы и другие.
5. Продукция:
 - Включены конечные продукты производства: слябы, блюмсы, заготовки, слитки, конвертерный газ и шлаки.

Основу процесса кислородно-конвертерной плавки составляет окисление примесей (углерода, кремния, марганца, фосфора) в жидком чугуне с помощью технически чистого кислорода, подаваемого через фурму [1]. Рассмотрим этапы технологического процесса, его разновидности, а также остановимся на особенностях конвертеров с верхней продувкой (BOF – Basic Oxygen Furnace), которые являются наиболее массовым типом оборудования в современной сталеплавильной практике.

Технологический процесс начинается с подготовки шихты. В конвертер загружают жидкий чугун (70–90 % от массы шихты) и стальной лом (10–30 %). Для связывания оксидов в шлак добавляют известь (CaO), а также охлаждающие добавки, такие как железная руда или окатыши, которые регулируют температурный режим [2]. Основной этап – продувка кислородом, при которой через водяную фурму в конвертер подают кислород под давлением 0,8–1,5 МПа со скоростью 2–4 м³/мин на тонну металла. При этом углерод окисляется до CO и CO₂, выделяя значительное количество тепла, что позволяет достичь температуры 1650–1700 °С. Кремний и марганец образуют оксиды, переходящие в шлак, а фосфор связывается в кальциево-фосфорные соединения при щелочной среде шлака [3]. После окончания продувки конвертер наклоняют, отделяя шлак (содержит 40–50 % CaO, 10–20% FeO) от жидкой стали. Шлак может использоваться в строительстве или перерабатываться для извлечения металла [4]. На завершающем этапе сталь выпускают в ковш, добавляя раскислители (алюминий, ферромарганец) для удаления остаточного кислорода. Температура металла на выходе составляет 1600–1650 °С [5].

Конвертерные производства различаются по способу подачи кислорода. Наиболее распространены конвертеры с верхней продувкой (BOF), где кислород подается через верхнюю фурму. Такие установки обеспечивают высокую скорость продувки (15–25 минут на плавку), низкие капитальные затраты и простоту эксплуатации [6]. Однако метод характеризуется неравномерным перемешиванием металла, что может приводить к локальным перегревам и увеличению потерь железа в шлаке (до 12–15 %) [7]. Для сравнения, конвертеры с нижней продувкой (Q-BOP) и комбинированной продувкой (LD-AC) обеспечивают более эффективное перемешивание, но требуют сложных систем охлаждения и дополнительных затрат на обслуживание [8].

Конвертеры BOF доминируют в мировой металлургии, обеспечивая около 60 % объема стали, выплавляемой по конвертерному методу [9]. Их популярность обусловлена простотой конструкции, высокой производительностью и возможностью быстрой модернизации. Например, внедрение автоматизированных систем контроля состава металла и давления кислорода позволило снизить содержание фосфора в стали до 0,02–0,03 % и повысить стабильность процесса [10]. Вместе с тем, BOF-технология сталкивается с проблемами экологического характера: выбросы пыли и CO₂ остаются выше, чем у современных аналогов с комбинированной продувкой [11].

Для исследования выбраны конвертеры с верхней продувкой (BOF), поскольку они представляют наибольший интерес с точки зрения масштабов применения и исторического развития технологии. Эти установки остаются основой сталеплавильных цехов в развивающихся странах, где важны низкие затраты на оборудование и возможность работы с разнообразными сортами чугуна. В то же время современные модификации BOF, такие как использование донных инжекторов для подачи инертных газов, позволяют частично компенсировать недостатки классической схемы и продлевать срок службы оборудования [12].

Обзор литературы. Управление содержанием углерода в кислородно-конвертерном процессе – одна из наиболее сложных задач металлургии, что подтверждается многолетними исследованиями. Классические подходы, основанные на термодинамических моделях и эмпирических зависимостях, остаются фундаментом для прогнозирования конечного состава стали. Например, работы [13] и [14] детально описывают кинетику окисления углерода, однако их модели не учитывают динамические флуктуации параметров, таких как температура ванны или состав шлака, что снижает точность в реальных условиях.

С развитием методов искусственного интеллекта акцент сместился на разработку алгоритмов машинного обучения [15] применили нейронные сети для прогнозирования времени окончания продувки, используя исторические данные о расходе кислорода и температуре отходящих газов. Это позволило снизить погрешность до 0.2 %, но потребовало значительных массивов данных и не решило проблему адаптации к аварийным режимам. Аналогичные исследования [16] показали, что градиентный бустинг (XGBoost) эффективен для классификации фаз плавки, но слабо работает при резких изменениях скорости выгорания углерода.

Гибридные подходы, сочетающие физические модели и ИИ, демонстрируют более высокий потенциал. Система Simetal Lomas (Siemens), описанная в работах [17], интегрирует динамическую модель теплового баланса с алгоритмами оптимизации, что повысило стабильность прогнозов на 12–15 %. Однако, как отмечают [18] (Nippon Steel), такие решения требуют постоянной калибровки под конкретное оборудование, что ограничивает их применение на устаревших производствах.

В отечественных исследованиях, например [19], акцент сделан на косвенных методах контроля. Использование акустической эмиссии и спектроскопии отходящих газов позволило оценить содержание углерода с погрешностью ± 0.15 %, но внедрение таких систем сдерживается их высокой стоимостью.

Критический анализ литературы выявляет ключевые пробелы:

- Недостаток адаптивности: большинство моделей не учитывают нестационарность процессов, характерную для российских предприятий.
- Проблема реального времени: даже современные системы (например, POSCO AI Converter) задерживают данные на 2–3 минуты, что критично при скорости выгорания углерода 0.3 %/мин.

- Зависимость от данных: ML-модели требуют «чистых» массивов, которые часто недоступны из-за человеческого фактора или сбоев датчиков.

Таким образом, актуальной задачей является разработка гибридных интеллектуальных систем, способных:

- Интегрировать «шумные» данные IoT-датчиков в реальном времени;
- Автоматически корректировать модели под изменяющиеся условия;
- Учитывать нелинейную динамику скорости окисления углерода на разных стадиях продувки.

Формализация объекта управления. Если проанализировать конвертерный процесс как объект автоматического управления (рис. 2), то можно выделить следующие управляемые величины, возмущающие и управляющие воздействия (вопросы контроля и регулирования охладителя конвертерных газов и газоочистки не рассматриваются).

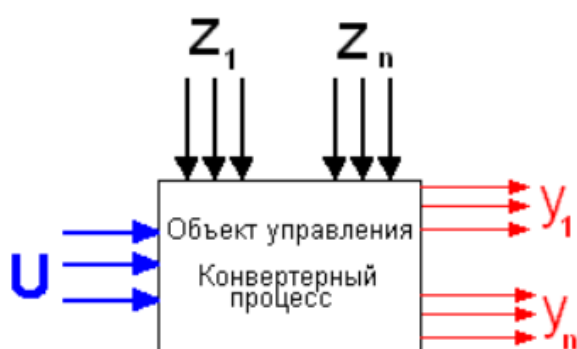


Рис. 2. Структурная схема конвертерного процесса как объекта автоматического управления

1. Основные выходные управляемые величины (величины \vec{Y}_1):
 - концентрация углерода в процессе и в конце продувки;
 - температура металла в процессе и в конце продувки;
 - масса металла в процессе и в конце продувки.
2. Дополнительные выходные величины (величины \vec{Y}_n):
 - окисленность металла в конце продувки;
 - масса шлака;
 - состав шлака;
 - количество конвертерных газов;
 - температура конвертерных газов;
 - состав конвертерных газов.
3. Контролируемые возмущающие воздействия (величины \vec{Z}_1):
 - содержание в чугуна кремния, марганца, серы, фосфора;
 - изменение температуры чугуна;
 - интервал времени между плавками;
 - содержание кислорода в дутье.
4. Неконтролируемые возмущающие воздействия (величины \vec{Z}_n):
 - содержание углерода в чугуна;
 - состав сыпучих материалов;
 - состав, размеры и температура лома;
 - масса и состав попадающего в конвертер миксерного шлака.

5. Управляющие воздействия (величины \vec{U}):

- масса чугуна;
- масса лома;
- масса руды в каждой порции сыпучих;
- масса извести в каждой порции сыпучих;
- время ввода в конвертер сыпучих материалов;
- расход кислорода и расстояние между кислородной фурмой и уровнем спокойной ванны;
- продолжительность продувки.

К основным выходным управляемым величинам отнесены те величины, получение конечных значений которых является целью конвертерного процесса (получение заданной массы стали заданного состава и необходимой температуры). Основные и дополнительные выходные величины характеризуют состояние конвертерного как по ходу; так и в конце плавки и их значения определяются возмущающими и управляющими воздействиями. К дополнительным выходным величинам отнесены такие величины, значение которых не является целью управления процессом. Кроме перечисленных выше можно выделить еще ряд дополнительных величин, характеризующих ход и состояние процесса: скорость окисления углерода, скорость изменения температуры конвертерных газов, интенсивность шума конвертера, излучение пламени над горловиной конвертера (в конвертерах с дожиганием СО), вибрацию продувочной фурмы и др.

Возмущающие воздействия подразделены на контролируемые, (значения которых измеряются и известны в процессе плавки), и неконтролируемые, значения которых нецелесообразно или невозможно измерить. Все возмущающие воздействия, кроме содержания кислорода и давления дутья, действуют до начала процесса, поскольку относятся в основном к характеристикам шихтовых материалов. Управляющие воздействия призваны обеспечивать реализацию целей управления (получение стали заданного состава и температуры). Первые два управляющих воздействия (масса чугуна и лома) относятся к разовым (статическим), которые по ходу плавки изменить невозможно. Почти все остальные воздействия динамические, т. е. могут изменяться во времени по ходу плавки.

Кислородно-конвертерный процесс (ККП) представляет собой сложную динамическую систему, характеризующуюся множеством взаимосвязанных входных и выходных параметров. Входными переменными выступают параметры продувки (расход кислорода, угол наклона фурмы), состав шихты, дозирование флюсов и температура поступающих материалов. Выходными – ключевые показатели качества стали (содержание углерода, фосфора, серы), температура расплава, структура шлака и энергоэффективность процесса. Однако экстремальные условия эксплуатации конвертера – высокие температуры, запыленность, вибрации, а также скоротечность химических реакций – существенно ограничивают возможности традиционных систем контроля. Многие критические параметры, такие как локальные изменения состава расплава или динамика шлакообразования, остаются недостаточно изученными в реальном времени, что приводит к неоптимальным режимам работы, повышенным энергозатратам и колебаниям качества продукции.

Возможность непрерывных измерений. Было бы полезно, если бы важные переменные процесса, такие как состав стали, состав шлака, температура стали и высота сырья в ванне могли измеряться непрерывно во время плавки. Это значительно помогло бы созданию и проверке динамических моделей процесса, и разработке стратегии управления.

Однако измерение этих переменных в большинстве случаев в настоящее время невозможно из-за высоких температур и запыленности окружающей среды, а также отсутствия доступных эталонных измерений. Поэтому предполагается, что динамические модели процесса лучше всего проверять с использованием измеренной скорости обезуглероживания и скорости накопления кислорода.

В кислородно-конвертерном производстве стали статические модели гарантируют, что требования к температуре и составу будут выполнены в конце партии. Однако, изменения в качестве сырья и ошибки во взвешивании сырья ограничивают точность этих статических моделей. Если бы состав стали и шлака, а также температура стали могли бы измеряться непрерывно, отклонения от цели могли бы быть обнаружены на ранней стадии и могли бы быть исправлены. Кроме того, статические модели не предсказывают и, таким образом, не могут предотвратить выплескивание, которое вызывает большие проблемы в работе конвертера.

Кислородно-конвертерная плавка остается энерго- и ресурсоэффективным методом производства стали, однако её оптимизация ограничена недостатком данных о состоянии процесса в реальном времени. Измерение ключевых параметров – состава металла и шлака, температуры стали, уровня сырья в ванне – затруднено из-за экстремальных условий, включающих температуру до 1700 °С, высокую запыленность и отсутствие устойчивых эталонных методов. Это создает барьер для внедрения динамических моделей процесса, способных оперативно корректировать отклонения и предотвращать аварийные ситуации, такие как выплескивание шлака [1]. Современные сталеплавильные цехи полагаются на статические модели, которые рассчитывают параметры плавки на основе заданных значений массы сырья и его состава. Однако такие подходы не учитывают изменения качества сырья, ошибки взвешивания и динамику химических реакций, что приводит к необходимости корректировки параметров в конце плавки, увеличивая риск невыполнения целевых показателей и риска выплескивания [3]. Для предотвращения таких ситуаций требуется переход к динамическим моделям, способным обрабатывать данные в реальном времени и адаптировать процесс под текущие условия [8].

Несмотря на сложность измерений, ряд параметров уже доступен для регистрации с помощью современных датчиков и систем. К ним относятся скорость обезуглероживания, определяемая через анализ газового потока на выходе из конвертера, и скорость накопления кислорода, контролируемая через расход кислорода на входе и давление в системе. Эти данные напрямую связаны с интенсивностью окисления углерода и тепловым режимом процесса [6]. Дополнительно используются акустические и вибрационные сигналы, которые могут указывать на начало выплескивания или изменение структуры шлака, а также давление в конвертере, аномалии которого могут свидетельствовать о нарушении гидродинамики ванны [7]. Для критически важных параметров, таких как состав шлака или температура стали, применяются косвенные методы: спектральный анализ отраженного света, моделирование на основе газового анализа, датчики давления и массы, а также термодинамические и кинетические модели, которые позволяют оценивать текущее состояние системы через комбинацию доступных данных [10].

Перспективные исследования направлены на развитие методов мониторинга в реальном времени. Например, работы Nippon Steel по газовому анализу с использованием масс-спектрометров демонстрируют возможности коррекции продувки через определение состава уходящих газов [5]. Европейские проекты, такие как EUROMETAL, внедряют датчики вибрации для предотвращения выплескивания, а корейская компания POSCO разрабатывает интеграцию оптических систем и машинного обучения для прогнозирования температуры стали [6].

Российские исследования МИСИС фокусируются на применении нейросетей для интерпретации данных о давлении и расходе кислорода [4]. Эти подходы показывают, что даже ограниченные данные могут быть использованы для построения надежных динамических моделей, если они корректно обрабатываются алгоритмами машинного обучения и термодинамического моделирования [4]. Интеграция таких методов в системы управления позволяет повысить точность конечного продукта, снизить риск выплескивания, уменьшить энергозатраты и увеличить срок службы футеровки за счет контроля теплового режима [12].

Таким образом, переход от статических к динамическим моделям управления кислородно-конвертерным процессом требует интеграции разнообразных методов измерения – от газового анализа до оптических сенсоров. Перспективные исследования демонстрируют, что даже косвенные данные, обработанные с помощью современных алгоритмов, могут значительно улучшить управление процессом. Внедрение таких решений позволит повысить экологичность, снизить себестоимость стали и обеспечить стабильность производства при изменяющихся условиях [11].

Выводы. В статье рассматривается ключевая проблема управления кислородно-конвертерной плавкой – точное определение момента прекращения продувки для достижения требуемого содержания углерода. Основные сложности связаны с высокой скоростью выгорания углерода (0.1-0.3 % в минуту) и отсутствием надежных методов оперативного контроля его содержания в расплаве. Традиционные подходы, основанные на термодинамических расчетах и регрессионном анализе, демонстрируют ограниченную точность (погрешность 15-20 %) из-за неучета динамических изменений параметров процесса. Более современные решения, включая нейросетевые модели и гибридные системы (Siemens, Nippon Steel), хотя и повышают точность до 85-90 %, требуют значительных объемов данных и сложны в адаптации к российским производственным условиям. Наиболее перспективными направлениями представляются разработка адаптивных алгоритмов управления, внедрение методов косвенного измерения (онлайн-спектрометрия, акустический анализ) и создание цифровых двойников с интеграцией данных IoT-датчиков. Решение видится в создании интеллектуальной системы, сочетающей гибридные модели с возможностью online-коррекции, что позволит повысить точность управления до 92-95 % и минимизировать производственные риски.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ульянов, В. А. *Металлургия стали* / В. А. Ульянов. – М.: Metallurgy, 1998. – С. 45–48.
2. Макаров, В. Л. *Технология производства стали в конвертерах* / В. Л. Макаров. – Екатеринбург: УГТУ, 2005. – С. 112–115.
3. Byars, M. *Steelmaking and Refining* / M. Byars, D. Jones. – New York: Springer, 2017. – P. 78–81.
4. Hanisch, C. *Oxygen Steelmaking: Fundamentals and Applications* / C. Hanisch. – Berlin: Springer, 2020. – P. 33–36.
5. ГОСТ 17745-90. *Сталь. Методы анализа шлаков*. – Введ. 1991-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1991. – С. 12–14.
6. Smolenskii, V. *Modern Trends in Steelmaking* / V. Smolenskii. – Moscow: MISIS, 2019. – P. 55–58.
7. *Combined Blowing in BOF Process* // Nippon Steel Technical Report. – Tokyo: Nippon Steel Corp., 2021. – P. 15–23.
8. *Best Available Techniques for Iron and Steel Production* / European Commission. – Brussels, 2022. – P. 45–48.
9. *Global Steel Industry Outlook* / World Steel Association. – Brussels, 2023. – P. 22–25.
10. Kim, Y.-S. *Advanced Oxygen Steelmaking Technology* / Y.-S. Kim. – Seoul: POSCO Technical Review, 2023. – P. 34–41.

11. Ливанов, В. А. Экологические аспекты металлургии / В. А. Ливанов. – М.: Экология, 2001. – С. 155–158.
12. Zhang, X. Innovations in BOF Steelmaking / X. Zhang. – Beijing: Metallurgical Industry Press, 2021. – P. 90–93.
13. Fruehan, R. J. The Making, Shaping and Treating of Steel / R. J. Fruehan. – Pittsburgh: The AISE Steel Foundation, 1998. – P. 210–213.
14. Deo, B. Fundamentals of Steelmaking Metallurgy / B. Deo, R. Boom. – London: Prentice Hall, 2007. – P. 120–123.
15. Su, Y. Prediction of Carbon Content in Converter Steelmaking Based on Multi-Output Least Squares Support Vector Regression / Y. Su, T. Chai, Z. Liu // ISIJ International. – 2016. – V. 56, № 8. – P. 1459–1467. – DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-102.
16. Schlüter, B. Advanced Process Control in Steelmaking: The Simetal Lomas System / B. Schlüter, J. Schmitt, H. Kellner // AISTech Proceedings. – 2015. – Vol. 1. – P. 45–52.
17. Григорович, К. В. Современные методы контроля состава стали в кислородном конвертере / К. В. Григорович, А. Н. Смирнов, В. В. Иванов // Металлургическая теплотехника. – 2019. – № 4. – С. 23–30.
18. Kumar, A. Machine Learning Applications in Converter Steelmaking: A Review / A. Kumar, R. K. Singh, S. Mukherjee // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2020. – V. 29. – P. 7892–7905. – DOI: 10.1007/s11665-020-05245-1.
19. Tanaka, Y. Hybrid Modeling for Real-Time Carbon Content Prediction in BOF Steelmaking / Y. Tanaka, K. Sato, M. Yamamoto // ISIJ International. – 2021. – V. 61, № 12. – P. 3200–3208. – DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-415.

Поступила в редакцию 26.05.2025 г., рекомендована к печати 23.06.2025 г.

ANALYSIS OF THE PROBLEMS OF MODERN CONTROL SYSTEMS FOR THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF BASIC-OXYGEN STEELMAKING

Zaitsev V.A., CHervinskii V.V.

The article studies control methods for the steel-making process in a basic-oxygen furnace (BOF) with top blowing. The analysis of traditional models and modern approaches (neural networks, digital twins, hybrid systems etc.) is carried out, their disadvantages are highlighted: low adaptability, dependence on large amounts of data and the complexity of implementation in the conditions of Russian production. Special attention is paid to the problem of operational carbon control due to its high burn-up rate (0.1–0.3%/min) and the lack of reliable direct measurement methods. It is noted that hybrid systems combining physical models and AI can improve control accuracy by up to 92–95%, but require further development for Russian conditions. The necessity of creating an intelligent system with online learning capable of minimizing the impact of dynamic changes in melting parameters has been established.

Keywords: oxygen converter process, hybrid models, operational control, machine learning, adaptive algorithms, dynamic models.

Зайцев Вячеслав Анатольевич

аспирант кафедры автоматики и телекоммуникаций ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: slav1991@mail.ru

Zaitsev Viacheslav Anatolevich

Postgraduate Student at Department of Automation and Telecommunications of the Donetsk National Technical University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

Червинский Владимир Владимирович

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматики и телекоммуникаций ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: tscherwi@mail.ru

CHervinskii Vladimir Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automation and Telecommunications of the Donetsk National Technical University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

**ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДАТЧИКОВ КОНТАКТА ФАЗЫ В СТРУКТУРЕ
АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ КАК ЗАВЕРШАЮЩИЙ КОМПОНЕНТ ПРИ
ПОСТРОЕНИИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА УЧАСТКА ШАХТЫ**

© 2025 *Маренич М.К., Гуляева И.Б.*

Обоснована целесообразность и возможность изменения концепции построения электротехнического комплекса участка шахты в части отказа от присоединения центральных проводников шахтных гибких экранированных кабелей к заземлениям при условии применения локальных средств выявления контакта фазы сети с корпусом электроустановки. Предложено техническое решение, позволяющее существенно расширить функциональные возможности системы автоматической защиты электротехнического комплекса участка шахты от аварийных и опасных состояний.

Ключевые слова: электротехнический комплекс участка шахты, ёмкость изоляции, электропоражающий фактор, датчик контроля контакта фазы, параметры, исследование, система автоматической защиты, структура.

Постановка проблемы. Эксплуатация шахтных участковых электротехнических комплексов (ЭТК) сопряжена с высокой вероятностью возникновения таких аварийных и опасных состояний, как междуфазные короткие замыкания и электрические цепи утечек тока на землю (вследствие повреждения изоляции силовых электрических присоединений, либо касания человеком фазного проводника). Применяемые, в связи с этим, технические средства защиты представляют собой устройства, защитная функция которых состоит в отключении напряжения, подаваемого на силовые присоединения ЭТК со стороны участковой трансформаторной подстанции. При этом, устройство шахтной участковой электрической сети выполняется исходя из условия её эксплуатации в режиме изолированной нейтрали трансформатора, что способствует снижению параметров электропоражающего фактора. Кроме этого, в структуре аппаратов защиты от утечек тока на землю предусмотрены технические средства, предназначенные для ограничения количества электричества в теле человека при его касании к фазе сети (средства компенсации ёмкостной составляющей тока утечки на землю и средства выявления и закорачивания на землю повреждённой фазы). При этом, в структуре системы электроснабжения (СЭС) участка шахты предусмотрено защитное заземление корпусов электроустановок как средство защиты человека от электропоражения при возникновении контакта фазы сети с этими корпусами.

Несмотря на это, шахтная участковая электрическая сеть продолжает оставаться объектом повышенной опасности поражения человека электрическим током. Так, электротравмы составляют около 2% от количества травм на шахтах. При этом свыше 66% приходится на электротравмы в подземных выработках, где большую часть (до 60%) составляют несчастные случаи в участковых электрических сетях линейного напряжения 660 В и 1140 В [1]. Из анализа структуры шахтного участкового ЭТК и специфики функционирования технических средств автоматической защиты от электропоражения следует, что в формировании электропоражающего фактора существенную, определяющую роль играет ёмкостная проводимость, образуемая между фазами сети и землёй. Структура этой проводимости состоит из двух составляющих:

- проводимость изоляции между фазными проводниками и внешней оболочкой кабеля ($C_{из1} \approx 64\%$ от общей ёмкостной проводимости изоляции);
- проводимость изоляции между фазными проводниками и заземляемым центральным проводом (ЦП - так называемой «заземляющей жилой») кабеля ($C_{из2} \approx 36\%$ от общей ёмкостной проводимости изоляции) [2].

Таким образом, применяемое в настоящее время обязательное заземление металлических корпусов рудничных электродвигателей электрическим присоединением их к заземлённым корпусам пускателей посредством ЦП кабелей электропитания, позиционируемое как защита человека от поражения электрическим током при касании к корпусу электродвигателя, находящемуся в контакте с фазой сети, фактически является техническим решением, существенно повышающим вероятность летального исхода в случае прикосновения человека к фазе сети, несмотря на её функционирование в режиме изолированной нейтрали трансформатора. Следует отметить, что такой способ заземления корпусов электродвигателей противоречит положению п. 1.4.2 ГОСТ 28298-89, согласно которому «не допускается использовать корпуса электрооборудования в качестве заземляющих проводников» [3]. При этом, из анализа повреждаемости асинхронных двигателей общепромышленного исполнения следует, что менее 2% их отказов приходится на пробой изоляции на корпус [4]. Очевидно, что применительно к электродвигателям рудничного взрывозащищённого исполнения эта величина будет ещё меньшей. Таким образом, техническое решение, призванное купировать последствия весьма маловероятного возникновения опасного состояния, формирует в шахтной участковой электрической сети постоянно существующий электропоражающий фактор, выраженный в повышенной ёмкостной проводимости изоляции между её фазами и землёй. При этом опасность электропоражения будет возрастать при эксплуатации электромеханических установок большой мощности, что обусловлено применением кабелей электропитания больших сечений и протяжённости, т.е. создающих высокие уровни ёмкостной проводимости изоляции. Этим обусловлена актуальность поиска альтернативного решения в части построения СЭС участка шахты, в соответствии с которым исключалось бы использование ЦП кабелей в качестве заземляющих жил при перераспределении функции противодействия электропоражению человека локализуемым в структуре электродвигателей средствам автоматического контроля контакта фаз с их корпусами и управления защитным отключением напряжения электропитания.

Анализ исследований и публикаций. Принципы построения и специфика эксплуатации шахтных участковых электрических сетей освещены в исследованиях Р.М. Лейбова [5], В.С. Дзюбана [6], В.П. Колосюка [1, 7], Б.В. Гуляева [8] и др., где обоснованы: структура СЭС, экранирование изоляции фазных проводников гибких кабелей, способ заземления металлических корпусов нестационарных электроустановок, принципы построения автоматической защиты от утечек тока на землю и способы ограничения количества электричества в теле человека при его касании к фазному проводнику и, в целом, - концепция автоматического защитного отключения шахтной участковой электрической сети. Однако, анализ предложенных технических решений [9-11] выявил ряд функциональных ограничений в части реализации защитной функции. В частности, применяемый в настоящее время способ автоматической компенсации ёмкостного тока утечки на основе регулирования индуктивности компенсирующего дросселя позволяет снизить величину этой составляющей тока утечки не более чем на 2/3, а способ выявления повреждённой фазы (с целью её последующего закорачивания на землю) на основе сопоставления разностей потенциалов между фазами и землёй не может быть применён в электрических сетях с ёмкостью изоляции, превышающей 1,0 мкФ/фазу.

При этом, вследствие наличия ёмкостных проводимостей, возрастают и токи в цепи заземления, достигая величин, превышающих допустимые параметры искробезопасности. Отказ от использования ЦП шахтных экранированных гибких кабелей в качестве заземляющих жил позволил бы, существенно снижая ёмкостную проводимость между землёй и фазами сети, в значительной степени воспрепятствовать проявлению указанных негативных факторов. При этом применение в качестве альтернативного технического решения локализуемых в структуре асинхронных двигателей средств выявления контакта «фаза – корпус», управляющих отключением силовых коммутационных аппаратов, совместно со средствами участковой защиты от утечек тока на землю позволило бы адаптировать данные защитные средства в общую структуру системы автоматической защиты от электропоражения в электротехническом комплексе участка шахты.

Целью исследования является обоснование структуры системы автоматической защиты от электропоражения в электротехническом комплексе участка шахты на основе локализации в силовых электрических установках средств выявления контакта в цепи «фаза - корпус», управляющих отключением напряжения электропитания и исключающих использование центральных проводов кабелей электропитания в качестве заземляющих жил.

Результаты исследования. Обособление центрального провода кабеля электропитания представляет собой его неприсоединение к металлическим корпусам как пускателя, так и управляемого им асинхронного двигателя (АД), что исключает присоединение последнего к заземлению. В связи с этим, защитная функция в отношении недопущения электропоражения человека может быть реализована устройством, локализуемым непосредственно в структуре асинхронного двигателя и содержащим датчик контакта «фаза – корпус» (датчик КФК) и связанную с ним цепь управления защитным отключением соответствующего пускателя. Схема такого технического решения представлена на рис. 1.

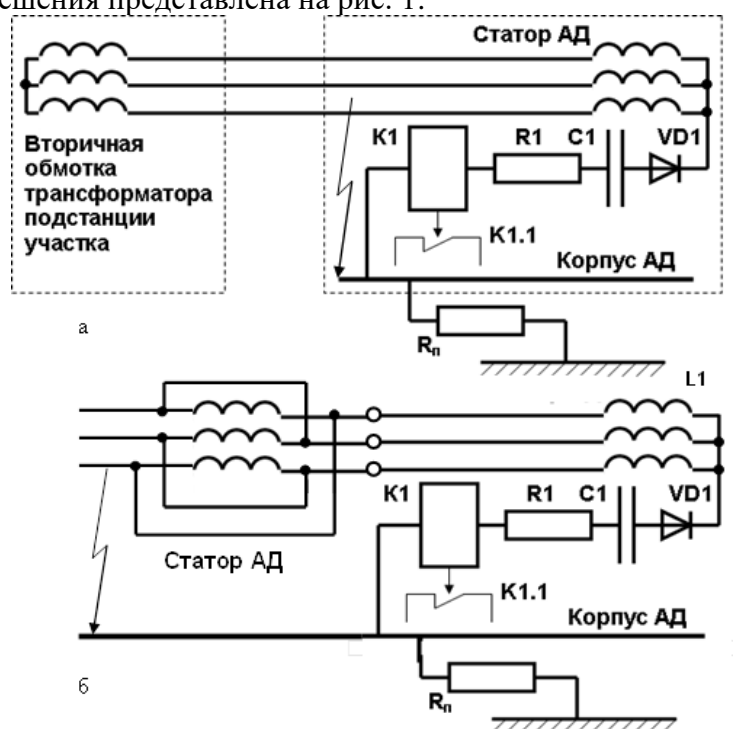


Рис. 1. Схема подключения датчика контакта фазы с корпусом АД: а - при соединении фазных обмоток статора АД по схеме «звезда»; б - при соединении фазных обмоток статора АД по схеме «треугольник»

В качестве датчика КФК в этом случае используется цепь последовательного подключения диода, конденсатора, токоограничивающего резистора и исполнительного реле (элементы VD1, C1, R1, K1 соответственно) между корпусом АД и точкой соединения в «звезду» его фазных обмоток статора. При соединении фазных обмоток статора АД по схеме «треугольник» подключения датчика КФК может быть осуществлено через узел присоединения, собранный по схеме «звезда» и состоящий из индуктивностей L1 (рис. 16) либо диодов, подключаемых в «звезду» анодами или катодами в зависимости от полярности присоединения диода VD1. Функционирование датчика КФК заключается в формировании синусоидальных полуволн тока в цепи обмотки реле K1 в случае возникновения повышенной электрической проводимости между фазой электрической сети и металлическим корпусом АД. Полярность подключения диода VD1 и переходное сопротивление ($0 < R_n < \infty$) между корпусом АД и почвой на работу этого датчика не влияют.

Реализация защитной функции согласно [12] состоит в том, что при срабатывании реле K1 своим контактом K1.1 присоединяет к корпусу АД изолированный от заземления ЦП кабеля электропитания (контакт X2, рис. 2). При условии, что структура пускателя дополнена исполнительным реле K2 (обмотка которого соединена между ЦП кабеля и фазами сети посредством резисторов R2 - R4), в этом случае контакт фазы сети с корпусом АД приводит к срабатыванию данного реле, управляющего отключением магнитного пускателя (МП). Такой же защитный эффект будет иметь место и в случае повреждения изоляции фазного проводника в самом кабеле электропитания, что сопровождается контактом этого проводника и ЦП кабеля. Таким образом, в этом случае изолирование от заземления центрального провода кабеля исключает присоединение ёмкостной проводимости между фазами и ЦП к ёмкостной проводимости между землёй и фазами сети, а его использование в качестве проводника информационного сигнала позволяет выполнить защитную функцию, формируемую датчиком КФК, локализуемым в структуре АД.

Применительно к схеме (рис. 2) вариантом присоединения обмотки реле K2 к фазам сети может служить цепь, состоящая из трёх диодов, подключенных катодами к фазам сети, а анодами через токоограничивающий резистор R1 – к обмотке реле K2, присоединённой вторым выводом к ЦП кабеля.

В практическом аспекте актуальность представляют вопросы обеспечения надёжности функционирования датчика КФК с учетом критичности параметров реле K1 уровням вибрации и диапазону температур при его монтаже в отсеке корпуса АД. Приемлемым техническим решением в этом случае является применение автомобильных электромагнитных реле серии 90.3747-10 (активное сопротивление обмотки $R_{K1} = 85$ Ом, номинальное напряжение постоянного тока 12 В, напряжение включения 8 В) или аналогичных, адаптированных к высоким уровням вибрации монтажной панели и диапазону температур окружающей среды от -50°C до $+80^{\circ}\text{C}$ [13].

Исследование данной схемы выполнено с целью определения:

- диапазона ёмкостей, в котором может находиться параметр C1 датчика КФК;
- целесообразности применения токоограничительного резистора R1 в схеме датчика КФК и параметров этого резистора;
- допустимого диапазона сопротивлений резисторов в цепи подключения обмотки реле K2 к фазам сети в условиях применения кабеля электропитания АД большой протяжённости.

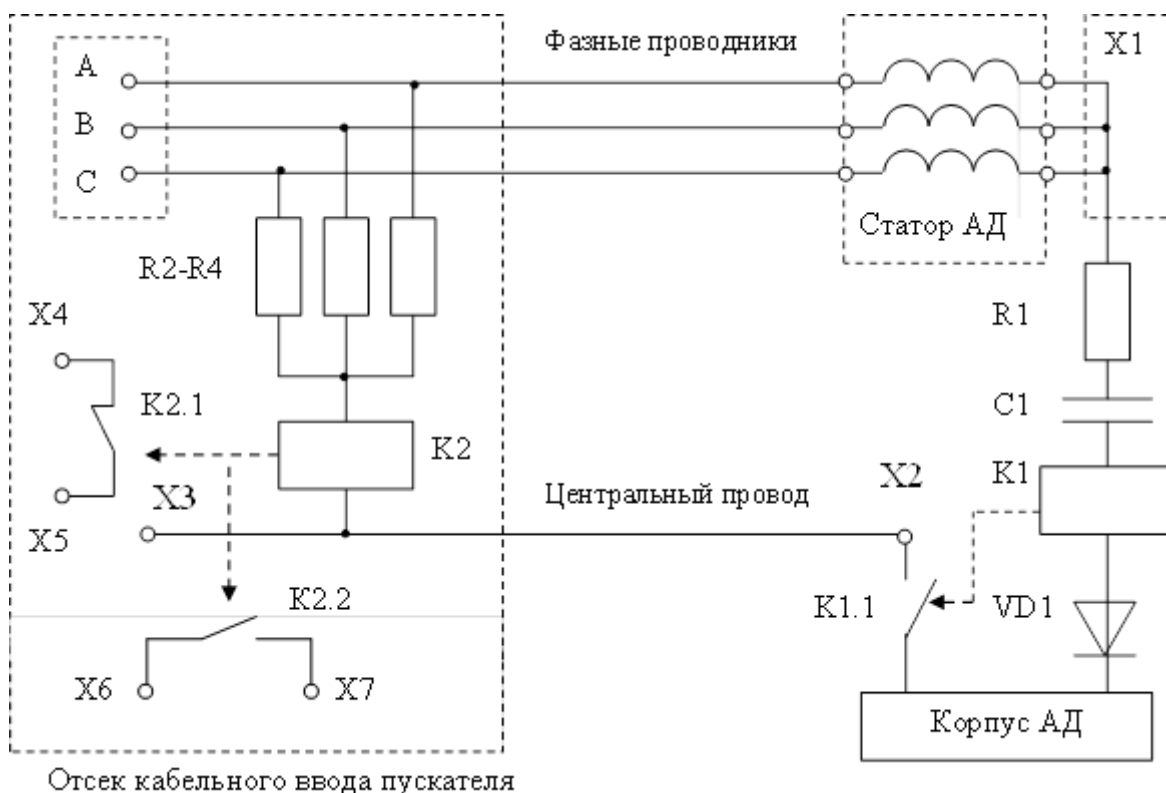


Рис. 2. Устройство защиты от повреждения в кабельном присоединении статора рудничного асинхронного двигателя

В компьютерную модель объекта исследования введены параметры обмоток статора АД типа 2ЭКВ4УС2, активная мощность которого составляет 220 кВт, что является средним по величине мощностным показателем электромеханического оборудования участка шахты. Параметры электросети: линейное напряжение - 660 В, частота - 50 Гц, число фаз - 3. Приняты параметры следующих компонентов схемы (по рис. 2): сопротивление обмотки реле K2: $R_{K2} = 700 \text{ Ом}$; сопротивление ЦП: $R_{ЦП} = 0,1 \text{ Ом}$; $R2 = 1000 \text{ Ом}$.

Результаты исследований представлены диаграммами напряжений на резисторе R_{K1} , имитирующем сопротивление обмотки реле K1. Установлено, что напряжение на этой обмотке представляется импульсами синусоидальных полувольт, убывающих (по мере заряда конденсатора C1) с постоянной времени $\tau_1 = k_n R_{K1} C1$ (рис. 3а, в), где k_n – коэффициент пропорциональности. Амплитуда импульса первой полуволны U_{m1} (конденсатор C1 не заряжен) равна амплитуде напряжения, приложенного к R-C-VD-цепи в момент контакта фазы сети с корпусом АД. С целью снижения этой амплитуды последовательно в цепь обмотки реле K1 (R_{K1}) может быть присоединён резистор R1, формируя цепь делителя напряжения $R_{K1} - R1$ (рис. 3д, ж). В этом случае $\tau_1 = k_n (R_{K1} + R1) C1$. Учтена возможность подключения конденсатора C2 параллельно обмотке реле K1.

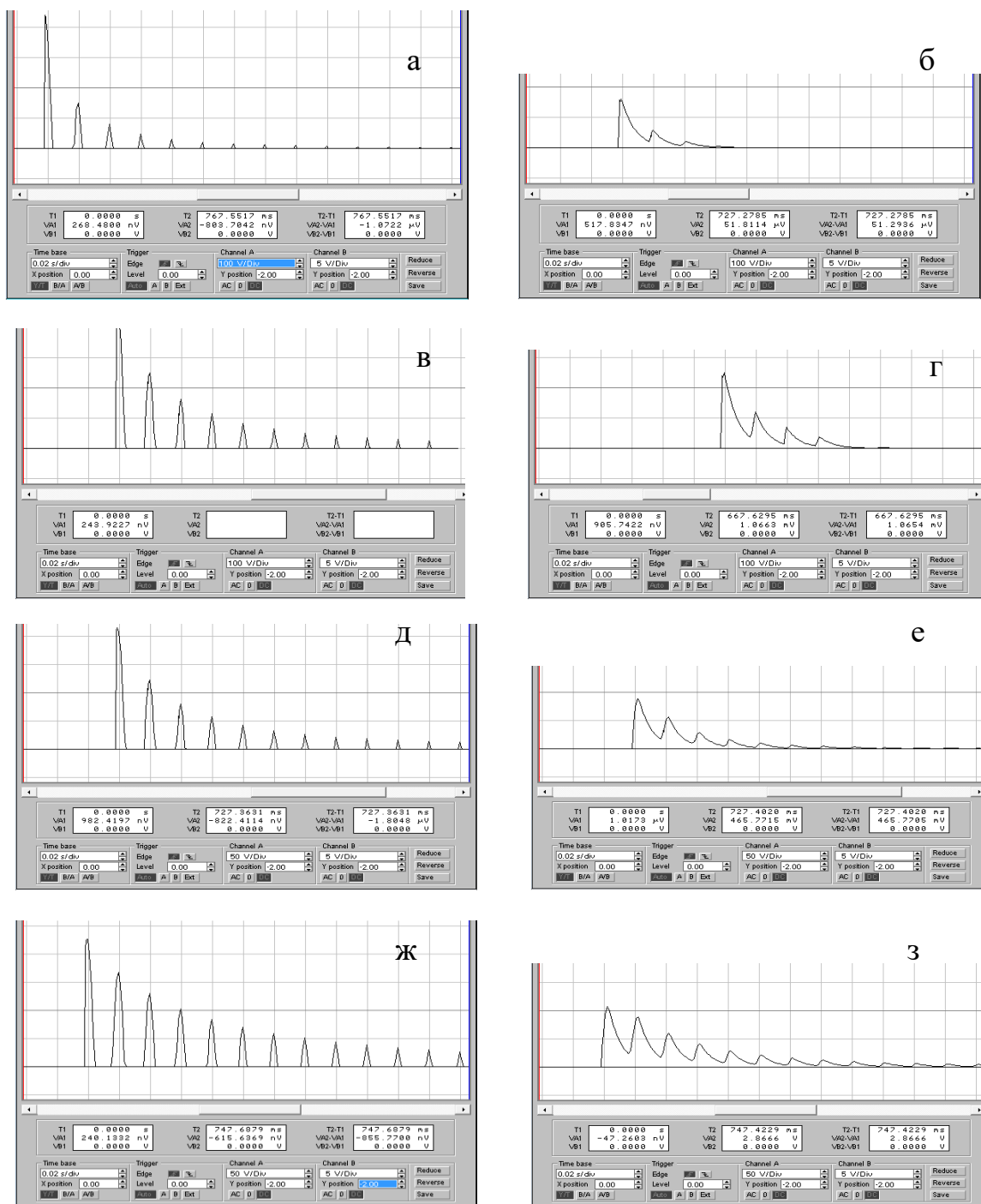


Рис. 3. Осциллограммы напряжений на сопротивлении $R_{K1} = 85$ Ом обмотки реле К1 (R-C-VD- цепи); параметры расчетной схемы по рис. 2: $C1 = 50$ мкФ (а, б, д, е); $C1 = 100$ мкФ (в, г, ж, з); $C2 = 100$ мкФ (б, г, е, з); $R1 = 0$ Ом (а, б, в, г); $R1 = 100$ Ом (д, е, ж, з); масштаб напряжения: а-г - 100 В/ деление шкалы; д-з - 50 В/ деление шкалы; масштаб времени - 0,02 с / деление шкалы

В контексте соответствия критерию надежности включения реле К1 введено допущение, что в течение обусловленного паспортными данными времени включения ($t_{вкл.} \geq 15$ мс ≈ 8 периодов сети) напряжение на его обмотке не должно быть ниже напряжения включения (8 В).

Учет коэффициента пропорциональности k_n обусловлен тем, что к конденсатору C1 R-C-VD-цепи в случае контакта фазы с корпусом АД прикладывается не постоянное напряжение (когда $k_n = 1$), а импульсы - полувольты синусоид напряжения, следующие с частотой сети ($f_c = 50$ Гц) с интервалами, равными половине периода. Таким образом, можно допустить, что на каждом интервале ΔT полувольты к конденсатору C1 приложено действующее напряжение:

$$U = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_{t_n}^{t_k} u^2 dt},$$

где t_n ; t_k - моменты начала и окончания интервала времени $\Delta T = 1/2f_c = 0,01$ с, u - мгновенная величина напряжения, приложенного к конденсатору C1 R-C-VD- цепи. В этом случае на каждом интервале ΔT будет последовательно накапливаться заряд конденсатора C1, представляемый фрагментами экспоненты:

$$U_c = U_{m1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

где $\tau = R_{K1} C1$; U_{m1} - амплитуда напряжения u_1 , приложенного к R-C-VD- цепи.

Из допущения, что на интервале между полувольтами напряжения, прикладываемого к конденсатору C1, его заряд не снижается, следует, что в формуле постоянной времени заряда этого конденсатора коэффициент пропорциональности должен быть принят равным $k_n = 2$, т.е. $\tau_1 = 2R_{K1} C1$ при отсутствии добавочного резистора R1 и $\tau_1 = 2(R_{K1} + R1) C1$ при его наличии.

По мере роста потенциала экспоненты заряда конденсатора C1 напряжение, прикладываемое к обмотке реле K1, будет представлено фрагментами синусоид напряжения, приложенного к R-C-VD- цепи, превышающими экспоненту напряжения заряда конденсатора C1, т.е. фрагментами синусоид (мгновенные значения: u_{K1}) напряжения, убывающими экспоненциально (с постоянной времени τ_1 при $k_n = 2$) по амплитуде и, по мере убывания, сокращающимися по продолжительности (t_n). В этом случае на интервале времени ΔT_Σ от начала до окончания процесса заряда конденсатора C1 имеет место закономерность увеличения скважности $s = T_t / t_n$ фрагментов полувольт импульсов напряжения, приложенного к обмотке реле K1 (где T_t – временной интервал, состоящий из продолжительности импульса фрагмента полувольты напряжения и следующей за ним паузы). Установлено, что на интервале ΔT_Σ коэффициент заполнения ($D=1/s$) импульсов (фрагментов) полувольт находится в убывающей линейной зависимости от числа n этих импульсов:

$$D = D_{\max} - an, \tag{1}$$

где $D_{\max} = t_{nc} / T_{nep.} = 0,5$ – коэффициент заполнения периода напряжения ($T_{nep.}$) сети его полувольтной (длительностью t_{nc}). Так, для параметров, представленных на (рис. 3) в выражение (1) преобразуется к виду: $D = 0,5 - 0,036n$.

Этот эффект подтверждается осциллограммами (рис. 3, а, в, д, ж). В этом случае на каждом i -м интервале формируется импульсное (фрагменты полувольты синусоиды) входное напряжение, подаваемое на обмотку реле K1. Эффективная величина этого напряжения будет соответствовать выражению (2), что позволит вычислить среднее значение напряжения на обмотке реле K1 на временном интервале ΔT_Σ :

$$U_{K1} = \sqrt{\frac{1}{\Delta T_\Sigma} \sum_{i=1}^n \int_{t_{ni}}^{t_{ki}} u_{K1}^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{\Delta T_\Sigma} \sum_{i=1}^n \int_{t_{ni}}^{t_{ki}} \left(u_1 - U_{m1} \left(1 - e^{-t/\tau} \right) \right)^2 dt}. \tag{2}$$

Надёжное включение реле К1 R-C-VD- цепи может быть обеспечено снижением амплитуд начальных импульсов напряжения, приложенного к его обмотке при одновременном сокращении пауз между этими импульсами. Этот эффект достигается подключением дополнительного конденсатора С2 параллельно обмотке реле К1. В этом случае соединённые последовательно конденсаторы С1 и С2 формируют цепь ёмкостного делителя напряжения с падениями напряжения на С1 и С2, обратно пропорциональными этим ёмкостям, что подтверждается сопоставлением осциллограмм (рис. 3а, б; рис. 3в, г). Присоединение ёмкости С2 параллельно обмотке реле К1 создаёт эффект «растягивания» задних фронтов импульсов напряжения вследствие чередующихся разрядов конденсатора С2, что для каждого i -го интервала между амплитудой входного импульса напряжения ($U_{m\text{ вх.}i}$) и началом формирования фрагмента синусоиды - следующего входного импульса напряжения описывается выражением:

$$U_{c2} = U_{m\text{ вх.}i} e^{-t/\tau_2}, \quad (3)$$

где $\tau_2 = R_{K1}C_2$, t - текущее время интервала формирования спадающей экспоненты напряжения на конденсаторе С2 и обмотке реле К1.

Таким образом, в случае присоединения конденсатора С2 параллельно к обмотке реле К1 напряжение на этой обмотке будет сформировано из отрезков, описываемых выражениями (2) и (3), соответственно, на интервалах от начала до амплитуды фрагмента синусоиды и от этой амплитуды до начала следующего фрагмента синусоиды. Среднее значение напряжения, приложенного к обмотке реле К1 R-C-VD-цепи может быть повышено при увеличении постоянной времени τ_2 разряда конденсатора С2. Это достигается увеличением его ёмкости при $R_{K1} = \text{const}$. Установлено, что величина напряжения, приложенного к обмотке реле К1 типа 90.3747-10, удовлетворяющая критерию его надёжного включения, применительно к сети линейного напряжения 660 В, может быть получена при $100 \text{ Ом} \leq R_1 \leq 300 \text{ Ом}$, $C_1 = 100 \text{ мкФ}$ и $C_2 = 500 \text{ мкФ}$ (рис. 4).

С целью задержки отпускания реле К1 на время, достаточное для блокировки отключенного состояния контактора коммутационного аппарата, ёмкость конденсатора С2, подключаемого параллельно его обмотке, может быть увеличена. Так, при $C_2 = 1000 \text{ мкФ}$ и $R_1 = 300 \text{ Ом}$ продолжительность величины напряжения на обмотке реле К1, достаточной для его включения, будет составлять не менее 0,4 с, что достаточно для выполнения блокирующей процедуры. Работоспособность датчика КФК подтверждена результатами экспериментов.

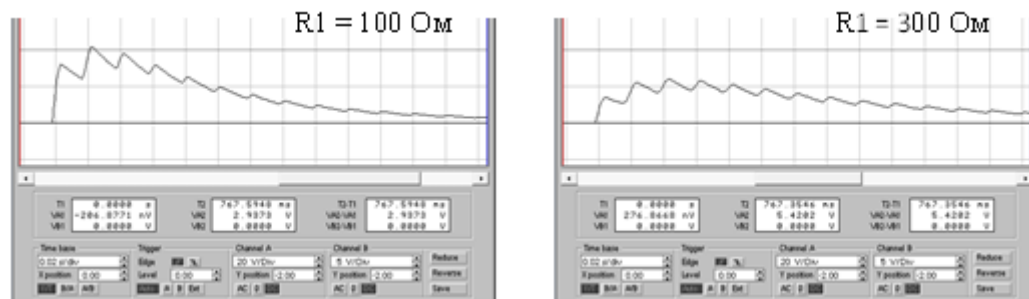


Рис. 4. Осциллограммы напряжений на обмотке реле типа 90.3747-10 при моделировании процессов в сети линейного напряжения 660 В, формируемых при условии присоединения резистора (R1) последовательно с обмоткой реле К1 и конденсатора ($C_2 = 500 \text{ мкФ}$) - параллельно этой обмотке; масштабы: 20 В/ деление шкалы; 0,02 с/ деление шкалы

Техническое решение в области выявления контакта фазы электрической сети с объектом защиты (с целью его последующего отключения) может быть применено в структуре МП - АД, а также адаптировано к применению в схемах силовых автоматических выключателей (АВ), распределительных устройств низшего напряжения (РУНН) участковых трансформаторных подстанций и т.п., дополняя и развивая, тем самым структуру комплекса средств автоматического защитного отключения силовых присоединений (рис. 5).

Компоновка и реализуемые функции вводимых в структуру ЭТК участка шахты технических средств (выделены серым фоном) соответствуют критериям, предъявляемым к устройствам (системам) управления, в данном случае, - автоматического управления отключением объекта защиты при возникновении его аварийного (опасного) состояния [14]. Это подтверждается совокупностью процедур, выполненных в процессе их синтеза:

- определение назначения технического средства;
- определение состояния объекта, отвечающего условию формирования управляющей функции;
- определение величины возмущающего параметра, достаточной для приведения в действие реагирующего органа;
- определение вариантов реагирующих органов и типов исполнительных устройств;
- обоснование принципа формирования управляющей функции.

По своей сути электромагнитные реле, подключаемые своими обмотками последовательно к R-C-VD-цепям в схемах датчиков КФК, выполняют функцию реагирующего устройства, входящего в структуру устройства защитного отключения силового присоединения при контакте фазы с ЦП кабеля (УЗО1), либо при контакте фазы с металлическим корпусом объекта (УЗО2).

Отличительной особенностью системы МП-АД является применение каскадного принципа управления защитным отключением МП, где при возникновении контакта фазы с корпусом АД предусмотрена промежуточная операция присоединения к этому корпусу ЦП кабеля электропитания, имитирующая, тем самым, эффект контакта фазы с ЦП кабеля и приводящая в действие УЗО1.

Ввиду применения короткого отрезка кабеля (кабельной перемычки), соединяющего групповой автоматический выключатель с магнитными пускателями распределительного пункта участка, и малой вероятности повреждения его изоляции, в применении структуры «ДК-УЗО1» в схеме этого выключателя отсутствует необходимость.

Схема (рис. 5) поддерживает функционирование участковой автоматической защиты от утечек тока на землю (АЗ), реагирующей на возникновение цепи утечки между фазой (фазами) сети и землёй. Необходимость её применения обусловлена тем, что отделением от заземления ЦП силовых кабелей не создаётся эффект полного подавления емкостной составляющей проводимости изоляции и не в полной мере, и в связи с этим подавляется электропоражающий фактор. Комплексные сопротивления изоляции сети представлены на схеме элементами $Z_{из}$.

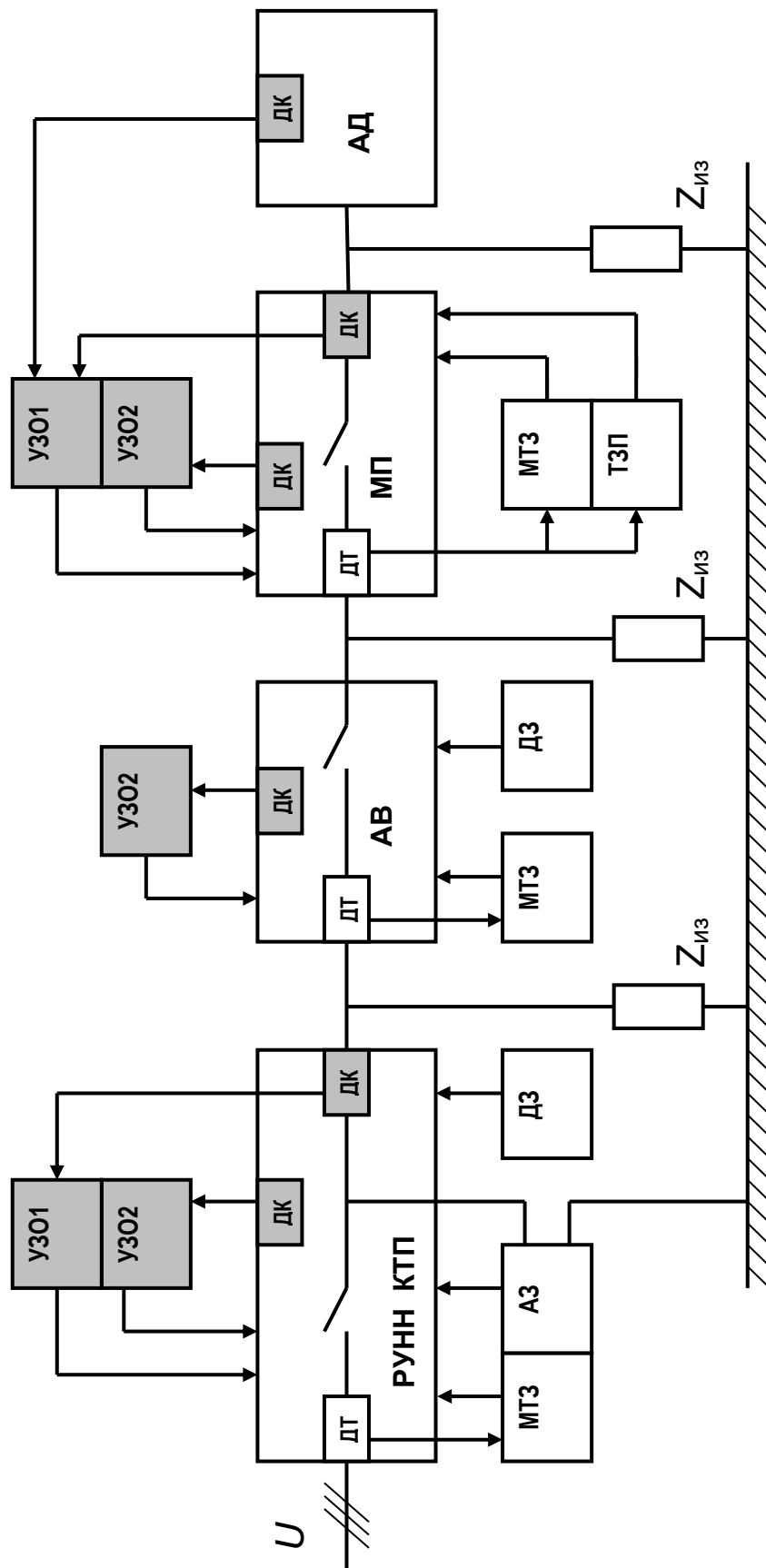


Рис. 5. Структура комплекса средств автоматического защитного отключения силовых присоединений электрической сети участка шахты: МТЗ - максимальная токовая защита; АЗ - автоматическая защита от утечек тока на землю; ТЗП - токовая защита от перегрузки АД; ДЗ - внешние дополнительные устройства защиты (при наличии); ДТ - датчик тока; ДК - датчик контакта фазы с объектом защиты; УЗО - устройство защитного отключения; 1 - при контакте фазы с ЦШ кабеля; 2 - при контакте фазы с корпусом объекта

Выводы. Обоснована целесообразность и возможность изменения концепции построения электротехнического комплекса участка шахты в части отказа от присоединения центральных проводников шахтных гибких экранированных кабелей к заземлениям при условии применения локальных средств выявления контакта фазы сети с корпусом электроустановки.

Разработана и исследована схема датчика контакта фазы с корпусом электроустановки в контексте его возможной локализации в структуре рудничного асинхронного двигателя. Обоснована структура системы автоматической защиты от электропоражения в электротехническом комплексе участка шахты на основе локализации в силовых электрических установках средств выявления контакта в цепи «фаза - корпус», управляющих отключением напряжения электропитания при неиспользовании центральных проводов кабелей электропитания в качестве заземляющих жил.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Колосюк, В. П. Электробезопасность в горной промышленности: монография / В. П. Колосюк, Ю. В. Товстик; под ред. В.П. Колосюка. – Донецк, Ноулидж (донецкое отделение), 2014. – 475 с.
2. Москалец, К. И. Методика расчёта частичных ёмкостей шахтных гибких кабелей / К. И. Москалец // Состояние изоляции шахтных кабельных сетей. Контроль изоляции и защита от утечек тока. Сборник статей под общ. ред. Л.В. Гладилина. – Москва: ЦНИИТЭИ угольной промышленности, 1963. – С. 47-58.
3. ГОСТ 28298-89 Заземление шахтного электрооборудования. Технические требования и методы контроля (периздание): межгосударственный стандарт: введен 1990-07-01. – М.: Стандартинформ, 2006 – 8 с.
4. Статистика отказов и анализ повреждаемости электрических машин [Электронный ресурс]. – <https://poznayka.org/s6047t2.html> (дата обращения 25.04.2025).
5. Лейбов, Р. М. Электрификация подземных горных работ: учебник для студентов, обучающихся по специальности "Электрификация и автоматизация горных работ" / Р. М. Лейбов, М. И. Озерной. – Москва: Недра, 1972. – 462 с.
6. Дзюбан В. С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях / В. С. Дзюбан. – М.: Недра, 1982. – 152 с.
7. Колосюк, В. П. Защитное отключение рудничных электроустановок / В. П. Колосюк. – М.: Недра, 1980. – 334 с.
8. Гуляев, Б. В. Взрывозащита и электробезопасность шахтных сетей: монография / Б. В. Гуляев. – Киев: Донецк: Высшая школа, 1985. – 138 с.
9. Гуляева, И. Б. Анализ эффективности защитной функции автокомпенсатора ёмкостного тока в структуре аппарата защиты серии «азур-1» / И. Б. Гуляева, Е. С. Дубинка, М. К. Маренич // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2022. – № 1(27). – С. 50-60.
10. Маренич, М. К. Анализ эффективности защитной функции короткозамыкателя повреждённой фазы в структуре аппарата защиты от утечек тока на землю / М. К. Маренич // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2022. – № 2(28). – С. 46-53.
11. Маренич, М. К. Ёмкость изоляции электросети участка шахты как фактор формирования тока в цепи заземления / М. К. Маренич, И. Б. Гуляева // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2022. – № 3(29). – С. 20-26.
12. Патент № 2832720 С1 Российская Федерация, МПК H02H 3/02, H02H 7/08. Устройство для выявления повреждения в кабельном присоединении статора рудничного асинхронного двигателя : заявл. 09.04.2024 : опубл. 28.12.2024 / М. К. Маренич, Л. А. Муфель, И. Б. Гуляева ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Донецкий национальный технический университет".
13. Реле электромагнитное 4-х контактное с кронштейном 12В 90.3747-10 / 75.3777-10 [Электронный ресурс]. – <https://sparox.ru/catalog/ehlektrika/rele/400959?instock=0&viewtype=list&sort=1> (дата обращения 25.04.2025).
14. Никаноров, С. П. Введение в концептуальное проектирование АСУ: анализ и синтез структур / С. П. Никаноров, Н. К. Никитина, А. Г. Теслинов. – Москва: РВСН, 1995. – 234 с.

Поступила в редакцию 30.05.2025 г., рекомендована к печати 25.06.2025 г.

LOCALIZATION OF PHASE CONTACT SENSORS IN THE STRUCTURE OF ASYNCHRONOUS MOTORS AS A FINAL COMPONENT IN THE CONSTRUCTION OF THE AUTOMATIC PROTECTION SYSTEM OF THE ELECTRICAL COMPLEX OF THE MINE SITE

Marenich M.K., Guliaeva I.B.

The feasibility and possibility of changing the concept of constructing the electrical complex of the shaft section in terms of refusing to connect the central conductors of the mine flexible shielded cables to the grounding, provided that local means of detecting the contact of the network phase with the electrical installation body are used. A technical solution is proposed that allows to significantly expand the functional capabilities of the automatic protection system of the electrical complex of the mine site from emergency and dangerous conditions.

Keywords: electrical complex of the shaft section, insulation capacity, electrical protective factor, phase contact control sensor, parameters, investigation, automatic protection system, structure.

Маренич Мария Константиновна

аспирант кафедры электрических систем
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный
технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: marenich_mk@mail.ru

Marenich Mariia Konstantinovna

Postgraduate Student at Department of Electrical
Systems of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Гуляева Ирина Борисовна

кандидат технических наук, доцент кафедры
электрических систем ФГБОУ ВО «Донецкий
национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail iraguliaeva1969@gmail.com

Guliaeva Irina Borisovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
at Department of Electrical Systems of Donetsk
National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С НЕЙРОСЕТЕВЫМ ПРОГНОЗОМ

© 2025 Левина Т.М., Альмухаметова Э.И., Сафронов Д.И., Ушаков А.С.

В настоящей статье дано описание цифрового двойника лабораторного стенда электродвигателя с частотно-регулируемым приводом. Рассмотрена архитектура разработанной программы, включающей модули симуляции, визуализации, обработки данных и нейросетевого прогнозирования, позволяющего предсказывать значения тока и выявлять аномальные режимы работы.

Ключевые слова: цифровой двойник, разработка, визуализация, разработка, нейронная сеть, прогнозирование.

Введение. Современный этап развития электроэнергетики сопровождается активным внедрением технологий цифровизации, автоматизации и искусственного интеллекта. Одним из ключевых направлений в этом процессе стало создание цифровых двойников, позволяющих не только моделировать поведение оборудования в реальном времени, но и проводить диагностику, прогнозирование и обучение [1].

Особую актуальность приобретает диагностика электродвигателей с частотно-регулируемыми приводами (ЧРП), которые находят широкое применение в системах автоматизированного управления технологическими процессами [2]. Однако сложность взаимодействия электродвигателя с преобразователем частоты создает новые вызовы для традиционных методов диагностики, что обуславливает необходимость разработки новых подходов к мониторингу технического состояния таких систем. Цифровой двойник создаст условия для безопасного и наглядного освоения принципов работы электродвигателя [3].

Для обработки данных и анализа систем всё больше используют искусственный интеллект, поэтому дополнительно внедрённая нейронная сеть позволит не только анализировать накопленные данные, но и выполнять прогнозирование параметров оборудования, выявлять аномалии в поведении [4].

Описание разработанного цифрового двойника. Графический интерфейс разработанного цифрового двойника лабораторного стенда электродвигателя с частотно-регулируемым приводом состоит из нескольких панелей (рис. 1):

- панели управления;
- панели мониторинга;
- графической панели;
- панели с предсказанием;
- панели с отчётностью.

Панель управления содержит все элементы для взаимодействия с цифровым двойником электродвигателя (рис. 2). Элементы выполняют следующие функции:

- регулятор частоты позволяет плавно изменять выходную частоту ЧРП от 0 до 100 Гц с помощью «слайдера» или точного ввода значения.
- кнопка «Пуск» для пуска и «Стоп» для отключения системы, а также кнопка «Очистить графики» для сброса отображаемых данных.
- выбор режима нагрузки – выпадающий список с тремя элементами: «Постоянный момент», «Вентиляторная нагрузка» и «Насосная нагрузка». Каждый режим изменяет характер поведения модели в зависимости момента и тока от частоты.

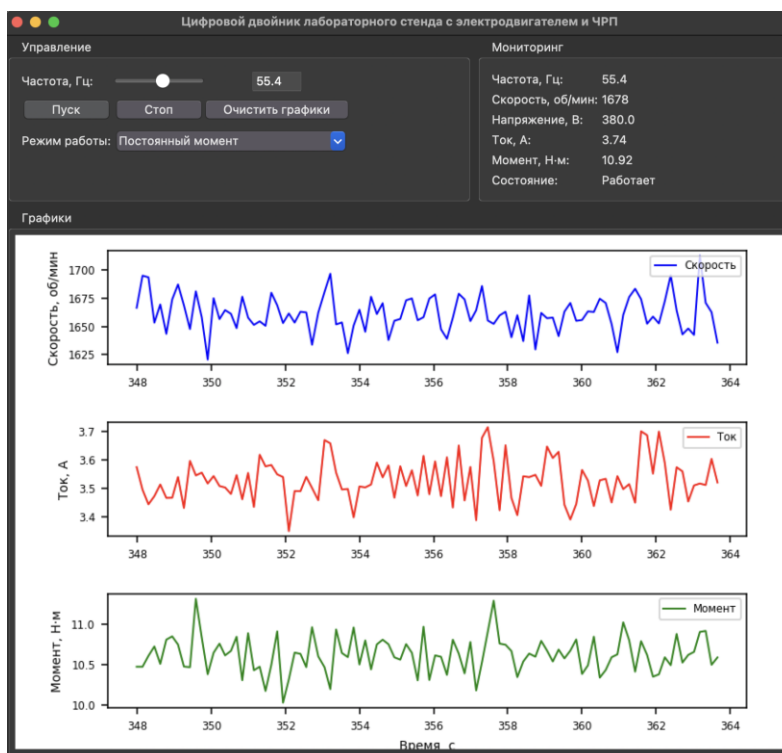


Рис. 1. Интерфейс разработанного цифрового двойника

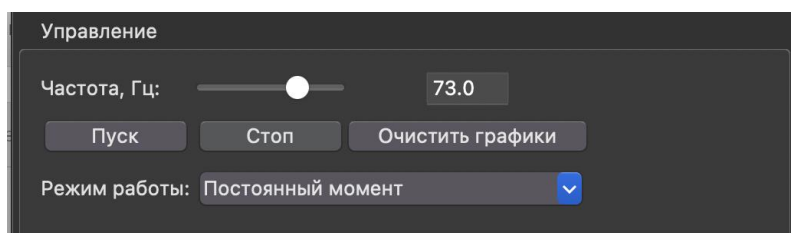


Рис. 2. Панель управления цифровым двойником

Стенд предназначен для моделирования работы высоковольтного присоединения, включая управление виртуальным выключателем и проверку корректности работы защитных систем путём подачи токов, имитирующих короткое замыкание. В панели мониторинга отображены текущие моделируемые параметры модели в реальном времени (рис. 3).

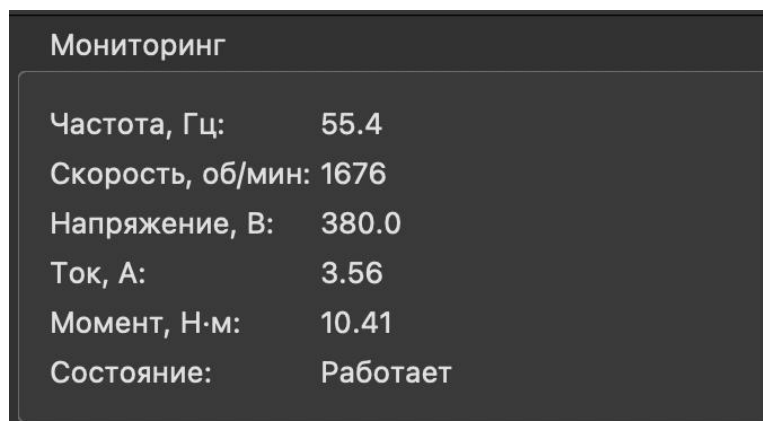


Рис. 3. Панель мониторинга, отображающая параметры в реальном времени

В данной панели отображены основные электрические величины (частота, напряжение и ток), механические параметры (скорость вращения и момент) и состояние системы (работает или остановлена).

Графическая панель служит для наглядного представления данных в выбранном промежутке времени, что позволяет наглядно оценить параметры системы (рис. 4).

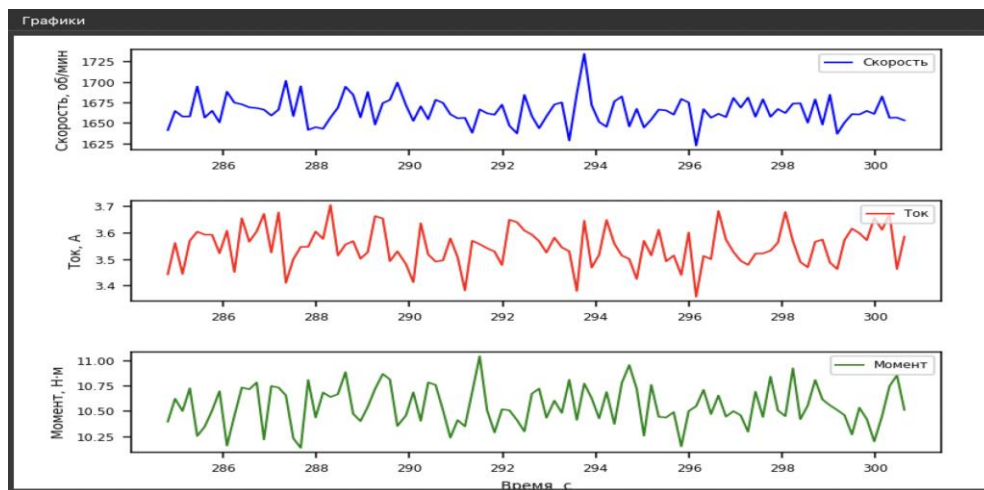


Рис. 4. Графическая панель, отображающая параметры за промежуток времени

В панели отчётности можно сформировать отчёт по имеющимся данным (рис. 5).

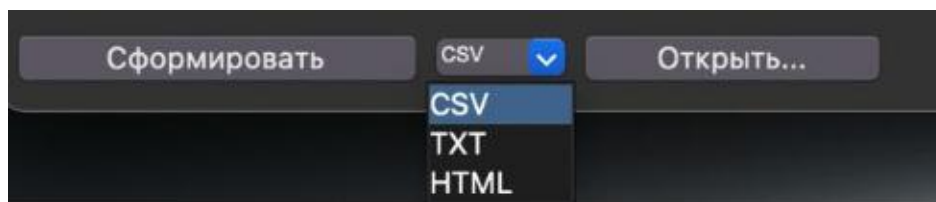


Рис. 5. Панель с формированием отчёта

В этой панели содержатся следующие элементы:

- кнопка «Сформировать» для создания отчёта;
- выпадающее меню с несколькими форматами («CSV», «TXT», «HTML»);
- кнопка «Открыть» для открытия папки, куда был сохранён отчёт.

В панели с предсказанием находится график тока (рис. 6).



Рис. 6. Панель с предсказанием значений тока

Сплошной линией указаны текущие значения, симулируемые в реальном времени, пунктирной – предсказанные.

Описание архитектуры цифрового двойника. Разработанный цифровой двойник содержит несколько основных модулей:

- модуль симуляции электродвигателя («CoreSimulation»);
- модуль визуализации («UIManager»);
- модуль обработки данных («DataController»);
- модуль нейросетевого прогнозирования («ForecastEngine»);
- модуль отчётности («ReportManager»).

В модуле симуляции двигателя воспроизводится поведение электродвигателя в различных режимах – от стандартной нагрузки до критических состояний. Он генерирует синтетические данные тока, производит эмуляцию циклической нагрузки и имитацию аварийных режимов по заданным сценариям.

Функция расчётов параметров в данном модуле реализует математическую модель работы электродвигателя с частотным регулированием. В его основе лежат физические зависимости между электрическими и механическими параметрами системы [5]. Например, скорость вала рассчитывается как линейная зависимость от частоты. Напряжение рассчитывается пропорционально частоте до номинального значения.

В модуле визуализации реализована графическая часть программы. Она предоставляет пользователю наглядные средства управления процессом симуляции и интерпретации её результатов.

Модуль обработки данных отвечает за получение временных рядов из симулятора, сглаживание данных, передачу потоков в модуль визуализации и нейросетевой анализ. Все данные формируются в едином формате в целях оптимизации дальнейшей с ними работы.

Модуль нейросетевого прогнозирования отвечает за прогнозирование будущих значений тока на основе текущего окна наблюдений. Модель построена на базе рекуррентной нейронной сети и работает в многошаговом режиме (прогноз на несколько шагов вперёд). Результаты прогнозирования визуализируются на отдельном графике – предсказанные значения выделяются пунктирной линией, а при приближении к пороговым значениям выводится предупреждение.

Модуль отчётности позволяет сохранить ключевые данные симуляции, такие как:

- экспорт данных симуляции и прогноза в различных форматах;
- фиксация событий превышения пороговых значений тока;
- журнал условий возникновения аномалий с временными метками.

Выводы. Разработанный цифровой двойник представляет собой удобный инструмент для воспроизведения поведения электродвигателя в различных режимах работы включая аварийные, обеспечивая безопасную и наглядную среду для обучения. Интеграция модуля рекуррентной нейронной сети расширила функциональность цифрового двойника за счёт возможности прогнозирования параметров тока. Модуль формирования отчётов позволит отслеживать исторические данные по работе электродвигателя в различных режимах, увеличивая возможности анализа его работы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лихтциндер, Б. Я. Моделирование и цифровые двойники / Б. Я. Лихтциндер, П. А. Ольберг // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2022. – Т. 30, № 4(76). – С. 20-32. – DOI 10.14498/tech.2022.4.2. – EDN LEKBMH.

2. Цифровые двойники: ключ к цифровой трансформации / М. Аллакулиев, А. Батырова, С. Аннабаев, А. Атаев // Символ науки: международный научный журнал. – 2024. – Т. 1, № 10-2. – С. 40-41.
3. Применение цифрового двойника в нефтегазовой отрасли / В. Н. Быкова, Е. Ким, М. Р. Гаджиалиев [и др.] // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2020. – № 1(28). – С. 8. – DOI 10.29222/ipng.2078-5712.2020-28.art8. – EDN ZHGXAM.
4. Никитин, А. В. Применение нейронной сети в имитационно-моделирующем комплексе на базе технических средств "ОВЕН" / А. В. Никитин, Л. В. Сушенцов, Э. М. Баширова // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля - 2024: Материалы Международной научно-методической конференции, Салават, 22–26 апреля 2024 года. – Салават: УНПЦ "Издательство УГНТУ", 2024. – С. 243-245. – EDN LAECLQ.
5. Денисов, С. Г. Технологии сбора и обработки данных для создания цифровых двойников / С. Г. Денисов // Бюллетень инновационных технологий. – 2023. – Т. 7, № 2(26). – С. 12-17.

Поступила в редакцию 30.05.2025 г., рекомендована к печати 27.06.2025 г.

DEVELOPMENT OF A DIGITAL TWIN OF A LABORATORY ELECTRIC MOTOR TEST BENCH WITH NEURAL NETWORK FORECASTING

Levina T.M., Almukhametova E.I., Safronov D.I., Ushakov A.S.

This article describes a digital twin of a laboratory test bench for an electric motor with a frequency-controlled drive. It examines the architecture of the developed program, which includes modules for simulation, visualisation, data processing and neural network forecasting, enabling the prediction of current values and the detection of abnormal operating modes.

Keywords: development, relay protection, microprocessor terminal, neural network, prediction, data analysis.

Левина Татьяна Михайловна

кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий ФГБОУ ВО ИНН «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,
Российская Федерация, РБ, г. Салават.
E-mail: safronovdaniil@vk.ru

Levina Tatiana Mikhailovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Information Technology of Ufa State Petroleum Technological University,
Russian Federation, RB, Salavat.

Альмухаметова Элина Ильнуровна

ассистент кафедры информационных технологий ФГБОУ ВО ИНН «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,
Российская Федерация, РБ, г. Салават.
E-mail: safronovdaniil@vk.ru

Almukhametova Elina Ilnurovna

Assistant at Department of Information Technology of Ufa State Petroleum Technological University,
Russian Federation, RB, Salavat.

Сафронов Данил Игоревич

студент кафедры информационных технологий ФГБОУ ВО ИНН «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,
Российская Федерация, РБ, г. Салават.
E-mail: safronovdaniil@vk.ru

Safronov Danil Igorevich

Student at Department of Information Technology of Ufa State Petroleum Technological University,
Russian Federation, RB, Salavat.

Ушаков Артем Сергеевич

студент кафедры информационных технологий ФГБОУ ВО ИНН «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,
Российская Федерация, РБ, г. Салават.
E-mail: safronovdaniil@vk.ru

Ushakov Artem Sergeevich

Student at Department of Information Technology of Ufa State Petroleum Technological University,
Russian Federation, RB, Salavat.

HAND GESTURE RECOGNITION USING SEMG WITH LSTM

© 2025 *Assalama L., Potekhin V.V.*

Using electromyography (EMG) signals has spread in many fields. LSTM networks is one of the most suitable methods for processing EMG because of their structure. In this work, two LSTM models were build, one layer (1L-LSTM) and multi-layers ML-LSTM. They were trained using Ninapro-DB5 dataset after augmenting it by averaging. Different input sizes were tested. 1L-LSTM and ML-LSTM scored an accuracy of 98.5% and 99.7% respectively. Moreover, they needed low testing time in the range of [60,240] mcs. In addition, the signal length was did not have much effect when using multi layers.

Keywords: LSTM, sEMG, hand gestures recognition, NinaPro-DB5, augmentation.

Introduction. In the middle of the 19th century, Emil du Bois was the first to measure the bioelectric currents in muscles. He used for that a galvanometer, and published his work and foundlings [1]. Later on, by the end of the century Etienne-Jules Marey was the first to record this electrical activity of the muscles graphically, which is considered the first EMG signal. Since then, EMG measuring tools and methods kept developing until today. Moreover, the usage of these signals has widely spread, from medical to industrial, even commercial applications.

One of the first uses of EMG was to control prosthesis; the works of Ralph Alter [2] and Bottomley, A. H. [3] represent some of the earliest examples. It was also used as a biofeedback when treating patients, like the work of Crow, J. L., et al [4], where the studied EMG's effectiveness as biofeedback when treating a patient after a stroke. Di Girolamo's work [5] falls under the same category, but represents the continuation in modern times.

Nowadays, they play a key role in in medical and clinical applications. Researchers used them to diagnose neuromuscular disorders like [6] who worked on detecting motor unit abnormalities in Amyotrophic Lateral Sclerosis (ALS) using high density EMG. Visser, L. H., Smidt, M. H., & Lee, M. L in their work [7], used to diagnose carpal tunnel syndrome and compared it to sonography. Another clinical usage is to detect muscle fatigue, as O'Bryan et al did in their work [8]. Prosthetics a, an example of this is the work of Kaluf, Brian, et al [9]. Another application is exoskeleton like the work of Cisnal, Ana, et al [10]. Human computer interfaces HCI also use EMG, the work of Sugiarto et al [11] for gesture recognition, and Wang et al [12] for silent speech recognition. In sports, researches inspect the effectiveness of EMG for optimizing athletic performance [13] and preventing injuries [14]. For sure, industry is also invests in EMG in many ways, like smart gloves [15], and sign language translation [16].

Hand gesture recognition is one of the widely inspected domains, and LSTM networks are one of the most important tools. Using LSTM in this field is not new, but it is still developing. Many researchers succeeded in building high performance models using LSTM on its own or within hybrid models with other types of networks. Sun et al used for dilation [17], Karnam et al build a hybrid CNN and Bi-LSTM architecture [18]. Cheng Yang and Chenxuan Zhang [19], Wang et al [20], and Kishore et al [21] used CNN-LSTM for their models.

NinaPro was the dataset for training and evaluating the models we built. We used the values of the sEMG signals as the features to reduce the complexity of the model. Moreover, we augmented the dataset to dataset using averaging; we followed the same methodology from our previous work [22]. Where we chose the suitable signal length, following the same steps, then we augmented the dataset in two ways: Doubling the dataset size by averaging every two successive samples of each class, and Doubling the dataset size by $C_n = \frac{n(n-1)}{2}$, by averaging each sample of each class with each sample of the rest samples of the same class.

Long Short-Term Memory Networks (LSTM). LSTM is a special type of RNN, it shares with it the same general structure, but differs in the structure of the cell, fig. 1 shows this structure.

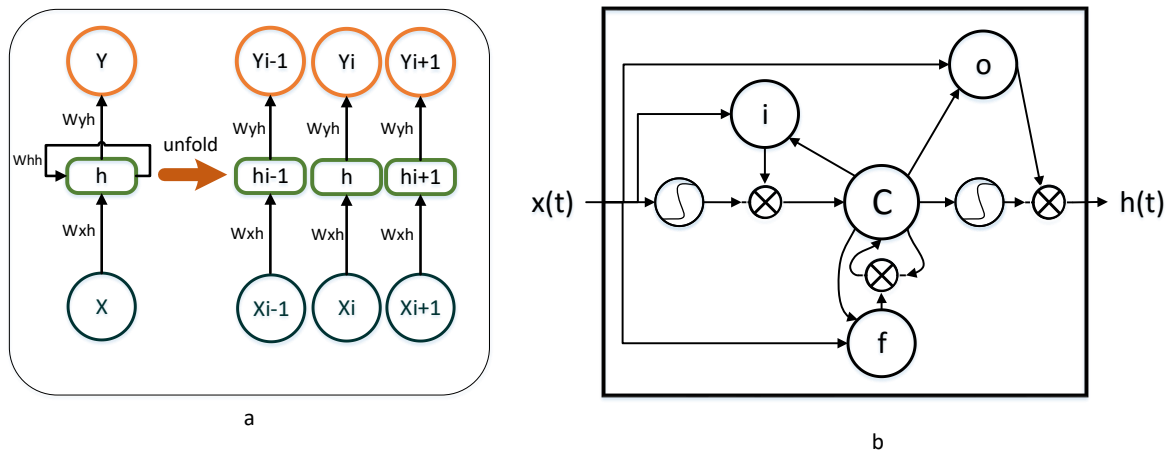


Fig. 1. LSTM structure: a) general LSTM structure, b) LSTM memory cell

Next are the main functions of an LSTM cell.

- Input gate:

$$i(t) = \sigma_g(w_i * x(t) + u_i * h(t-1) + b_i)$$

- Output gate:

$$o(t) = \sigma_g(w_o * x(t) + u_o * h(t-1) + b_o)$$

- Forget gate:

$$f(t) = \sigma_g(w_f * x(t) + u_f * h(t-1) + b_f)$$

- Memory cell:

$$c(t) = f(t) * c(t-1) + i(t) * \sigma_h(w_c * x(t) + u_c * h(t-1) + b_c)$$

- Output:

$$h(t) = o(t) * c(t)$$

Where:

x : input, c : excitation / LSTM cell, h : activation coefficient, w : feedback coefficient, b : bias, σ : feedback nonlinearity.

The dataset. NinaPro-DB5 is the dataset used in this work. It contains samples that represents 52 hand gestures and the rest sample, which counts up to 53 classes. The samples are obtained using two Myo armbands, each with 8 sensors; we used the samples of one Myo armband only; to reduce processing complexity during training stage by considering a fewer number of values, and taking into simplicity of use for the future user by requesting wearing one armband rather than two. The rest signal samples form about half the total number, but to avoid the problems caused by unbalanced classes we choose randomly a set of these rest samples with a size close to that of the other classes.

Our approach. We used the raw signals, without any further feature extraction. We examined the effect of signal length (time-steps) on the performance, and the effect of augmentation too.

The suggested approach includes follows four steps, the first step is choosing the sample's size, aiming at having the biggest number of samples and keeping as much time-steps in each sample as possible since they represent the features for the model to learn. Second, we doubled the samples by two/ multi-times. Then, comes the training stage. Finally, we tested model and evaluated the performance.

Evaluation criteria are accuracy, loss, training time and testing time.

The structure of the 1L-LSTM, as shown in fig. 2, consists of three layers:

- Input layer with 8 channels,
- LSTM layer,
- Output layer with 53 units.

The size of the layers decreases right wise (from input to output).

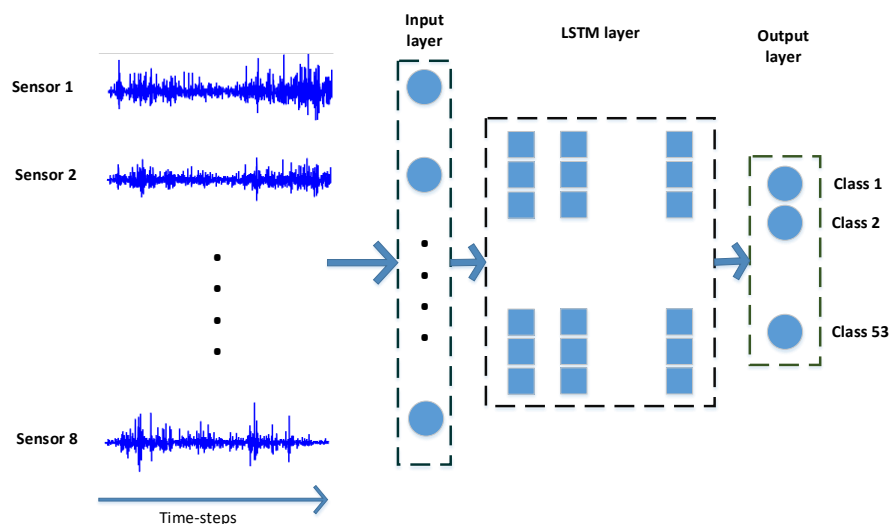


Fig. 2. 1L-LSTM model structure

To build ML-LSTM, two layers were added:

- Simple RNN layer right after the input layer
- Simple RNN layer right after the LSTM layer

This structure, shown in fig. 3, was inspired by concept formation or conceptualization, which is the process by which our brains decompose information and then recombine it to create our own concepts. This involves decomposition, that is breaking down complex information or experiences into simpler parts (more components), then, re-composition, where the brain recombines these elements to form new concepts or ideas (less components).

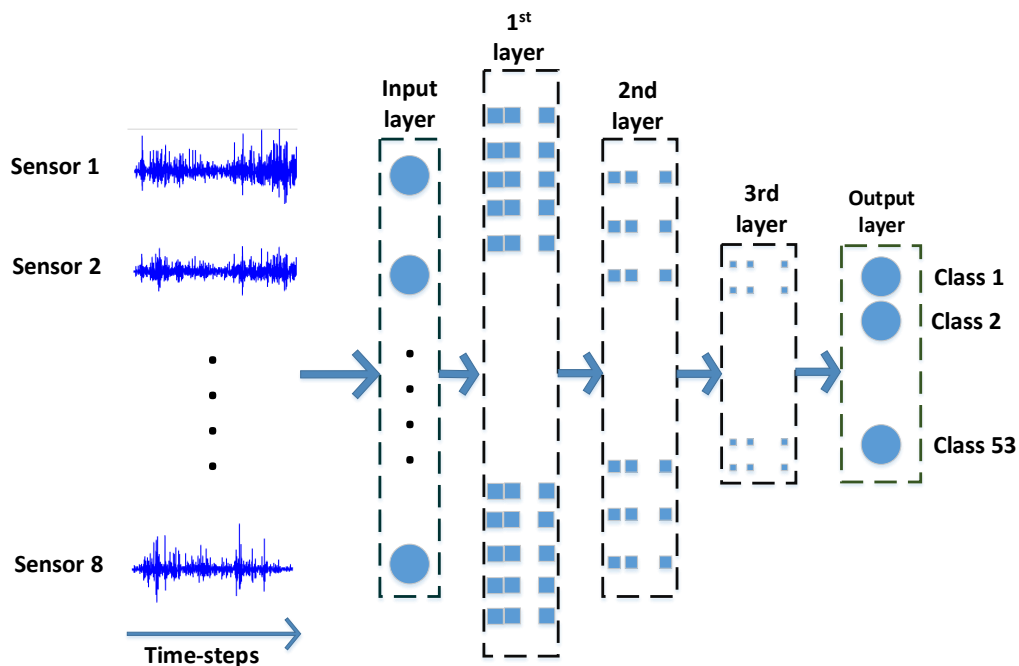


Fig. 3. ML-LSTM model structure

We built a special library for preprocessing the NP-DB5 dataset. Python libraries are the tool used for training and evaluating. Intel(R) Core(TM) i7-10870H CPU is the processor used in all the stages: preprocessing, augmenting, training and testing.

Augmentation effect. The first experiment was training the model using the original NinaPro-DB5 dataset without augmentation. Three signal lengths were tested: 200, 300 and 650 time-steps. However, the model could not learn, even when using longer signals. Fig. 4 shows the accuracy and loss of the model 1L-LSTM.

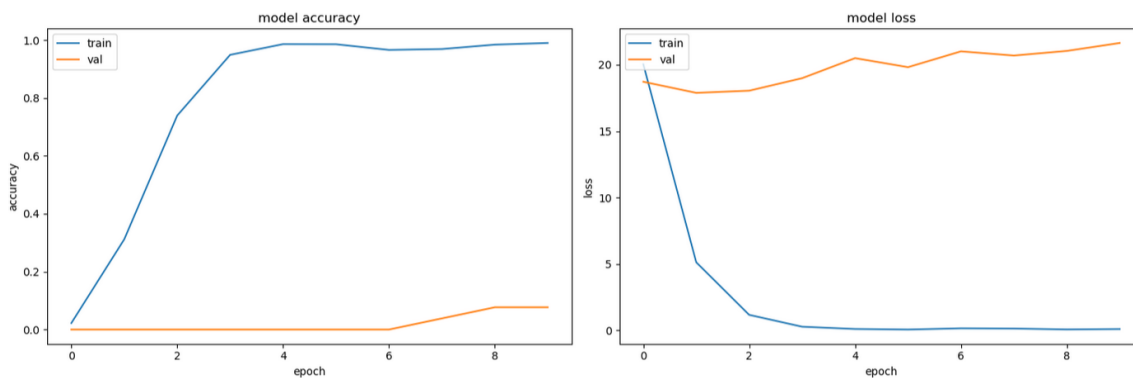


Fig. 4. 1L-LSTM model accuracy and loss when trained using the original NinaPro-DB5 dataset (signal length 650 time-steps)

Second experiment was performed using the doubled dataset, which we got by averaging every two successive sample in each class, and adding the result to the corresponding class. This helped the model learn, and the performance was significantly elevated; but it was still much less than the desired performance. However, the longer the signal the better the performance was. As fig. 5 shows, the model still over fits, and fails to generalize during the evaluation stage.

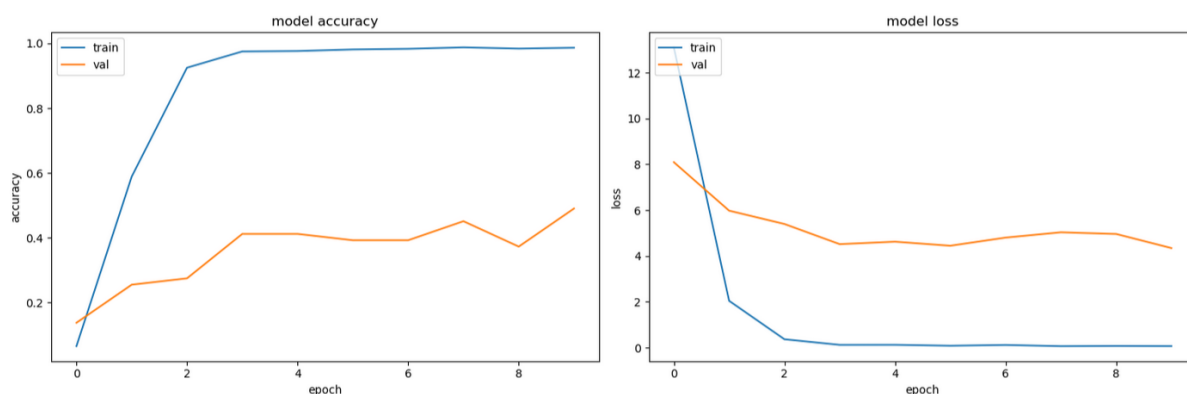


Fig. 5. ML-LSTM model accuracy and loss when trained using the doubled dataset (signal's length: 650 time-steps)

Thirdly, we doubled the dataset many times, by averaging every two samples of the same class, and adding the new sample to the class. Training the two models using this dataset gave the set goal. The signal's length effect was noticeable with 1L-LSTM, but it slightly affected ML-LSTM.

This result is expected; having enough samples compared to the considered features (original values: 200×8 , 400×8 or 650×8) certainly helps the model learn better and achieve the desired performance. Next, we present the results for each model when trained using the multi-times doubled datasets with different input sizes.

One layer LSTM (1L-LSTM). As fig. 6a shows, the 1L-LSTM model accuracy, the model reached the highest accuracy value of 98.5% when we used the dataset of signals with the size of 650 time-steps. Moreover, it differs by 2.1% and 2.5% from the results when using signals of the size 400 time-steps and 200 time-steps respectively, this difference could affect the result of any EMG-based control system that uses such a model for recognition. Again, taking into account that the features in our case are the raw values of the signals from the eight different sensors, this result is expected, since having more features and longer signals with more relations to time would help the model build more connections and hence improve its performance. Again, this is obvious in fig. 6b, which shows that training the model with the longest signals allowed the model to decrease the testing loss to about 0.01.

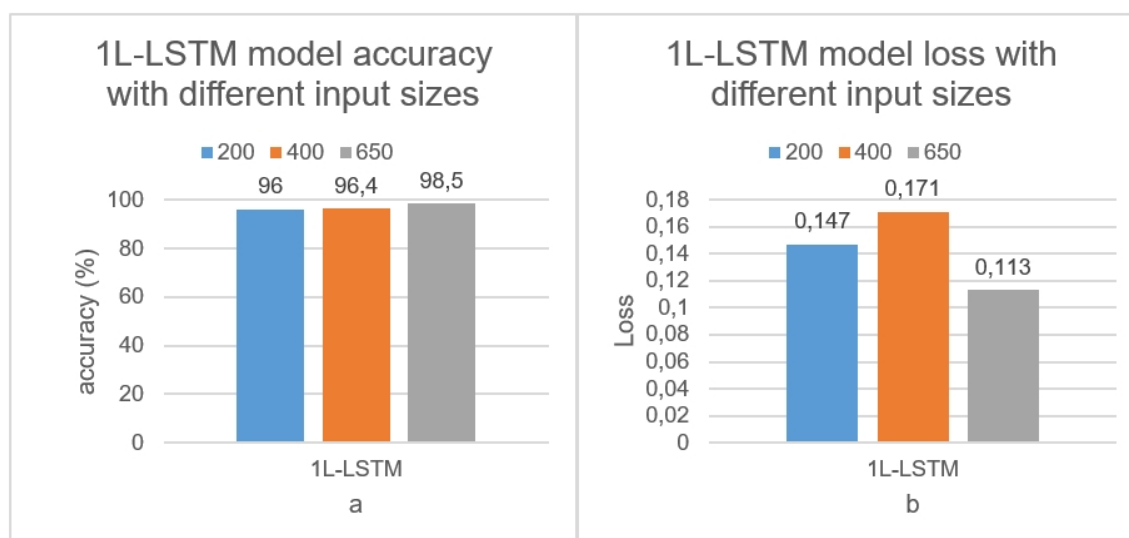


Fig. 6. 1L-LSTM model's accuracy using the multi-times doubles datasets with different input sizes: a) 1L-LSTM model accuracy, b) 1L-LSTM loss

Unfortunately, the model spends a lot more time in the testing stage when the signal length is 650 time-steps, compared to the time it needs when the signal's length is 200 time-steps or 400 time-steps. In the training stage, the model needed the minimum time when the signal's length was 400 time-steps, yet the difference is not that big since the training is static and performed off-line and will not affect the future system if used with a control system. Fig. 7a shows the training time of the model when trained with different input sizes, and fig. 7b shows the testing time.

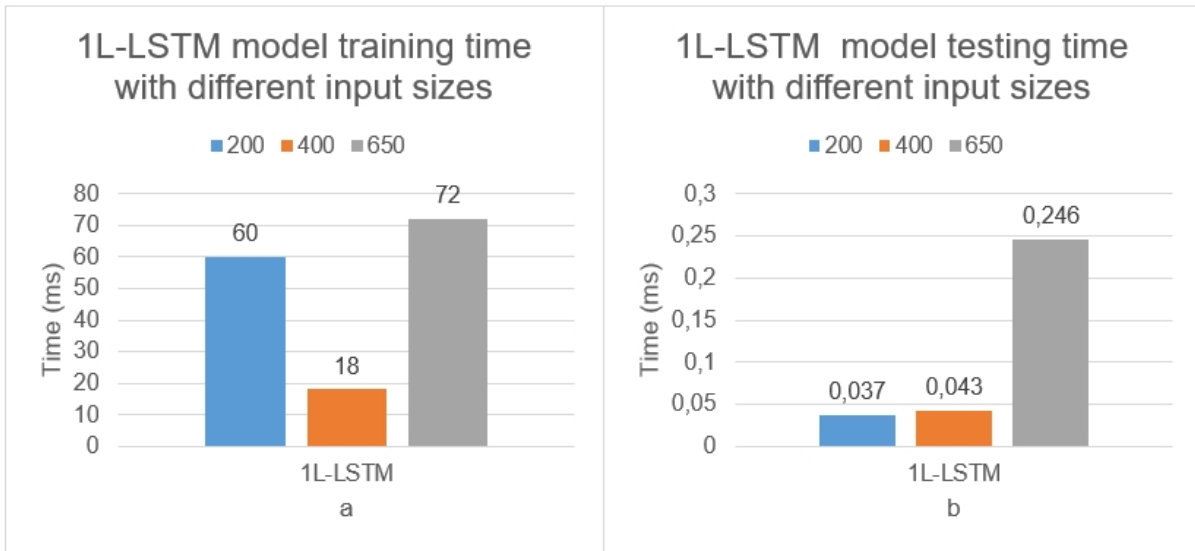


Fig. 7. 1L-LSTM training and testing time when trained using multi-times doubled datasets with different input sizes: a) training time, b) testing time

Multi-layer LSTM (ML-LSTM). Fig. 8a and fig. 8b show the model accuracy and loss respectively. The longer the signal the better the accuracy, and the lower the loss. As shown in fig. 9a the minimum training time was when the signal's length was 650 time-steps. While the differences in testing time were not that significant, as shown in fig. 9b.

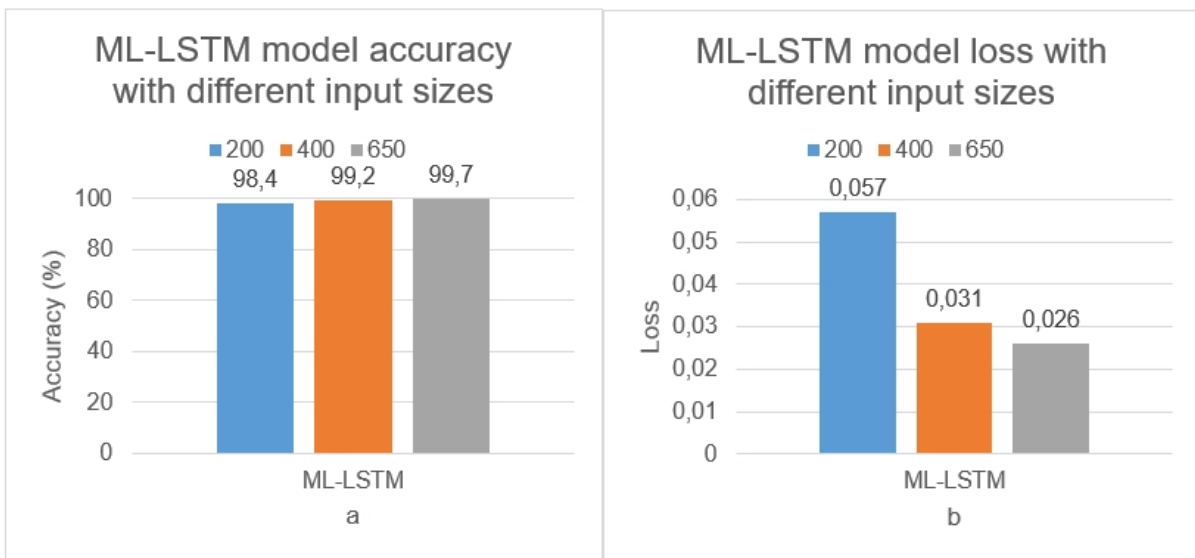


Fig. 8. ML-LSTM model accuracy using the multi-times doubled datasets with different input sizes: a) ML-LSTM model accuracy, b) ML-LSTM loss

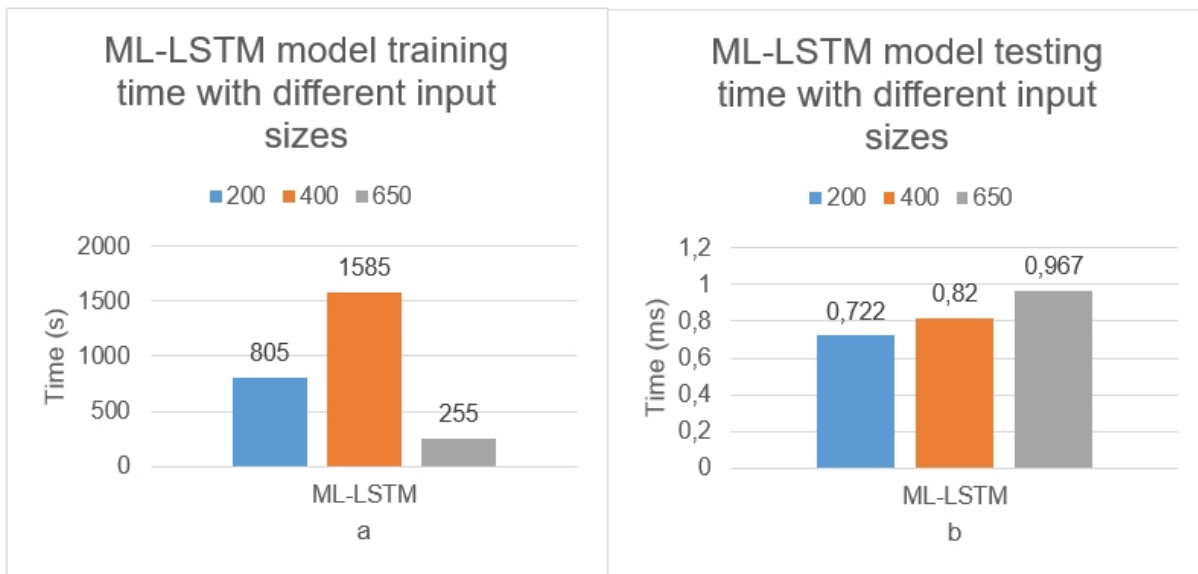


Fig. 9. ML-LSTM model training time and testing time when trained using the multi-times doubled datasets with different input sizes: a) training time, b) testing time

Comparing 1L-LSTM to ML-LSTM. Table 1 shows that ML-LSTM outperformed 1L-LSTM model in two out of four of the evaluation categories considered, it scored higher accuracy, with less loss, but it needed much more time to train and test, which is expected since it has much more parameters to update and modify.

Table 1. Comparing 1L-LSTM and ML-LSTM performance

Model	Accuracy (%)	Loss	Training time (sec)	Testing time (μsec)
1L-LSTM	98.5	0.11	72	246
ML-LSTM	99.7	0.03	255	970

Results discussion. Table 2 shows the results of our approach and some of the state-of-the-art researches in the field. Compared to the first five approaches, which use LSTM and DL, the suggested approach in this work outperformed them, although it had to classify the samples into 53 classes, which is more complex.

Table 2. Model accuracy of our approach and some of the state-of-the-art approaches

Approach	Dataset	Gestures num (classes num)	Model accuracy
4-layer 3rd Order Dilation (pure LSTM) [17]	NinaPro-DB2(B)	17	79.9%
CNN& Bi-LSTM[18]	NinaPro-DB2 UCI Gestures	50 7	95.93% 98.33%
CNN-LSTM[19]	NinaPro-DB2/DB3	13	89.37%
4-stream DL[15]	NinaPro-DB1 NinaPro-DB9	18	94.31% 98.96%
Res-LSTM[16]	NinaPro-DB1	52	91.03%
WaveFormer[23]	NinaPro-DB5	52	87,53%
CNN-transformer[24]	HD-sEMG	65	97,75%
CNN-transformer[25]	HD-sEMG	65	91,98%
TCN-transformer-LSTM[26]	experimental	5	98,82%
TCN [26]			96,32%
1L-LSTM	NinaPro-DB5	53	98.5%
ML_LSTM	NinaPro-DB5	53	99.7%

The next four methods (WaveFormer [23], CNN-Transformer [24, 25], TCN [26]) are examples of lightweight models. Developing such models has spread widely recently to provide suitable systems for low-power devices; because of their low computational cost and small size which leads to higher energy efficiency and scalability. The suggested approaches in the work still outperformed these models in terms of accuracy, as expected because LSTM are capable of sequential modeling and has a built in memory that can chose what to drop and what to remember. In addition, they have the ability of learning long-range dependencies dynamically (unlike TCN, which can obtain this only after training. Moreover, they can handle variable-length input. However, although the lightweight models are more suitable for a low-power device in the training stage; they still draw back behind LSTM in the final real-life usage when handling a sample at a time. LSTM must perform only a fixed number of operations, which means the complexity is $O(1)$, while for CNN-Transformer for example to process a new sample at time t , a standard Transformer requires the entire sequence from time 0 to t to be re-processed to compute new self-attention scores($O(t^2)$ complexity). Moreover, some of them use HD-sEMG (high-density sEMG) to build image like input data, which is less comfortable for the end user as it requires using a net of many sEMG sensors rather than an armband with a few sensors.

To get the best of the two worlds, one can adopt the following strategy:

Train the suggested models (1L-LSTM / ML-LSTM) off-device in a powerful environment (high performance workstation, cloud storage); then implement the optimized model on the MCU or any other low-power device needed.

Use lightweight-models for online training to improve the performance continuously, or schedule Re-training sessions off-device in a powerful environment, then again implement the improved model with the new parameters.

Conclusion. In this work, we build two LSTM based models to use them for hand gesture recognition using sEMG signals. We studied different situations: different signals' length, different training dataset size. The results show that high performance using signals' original values without any further feature extraction requires having enough data samples. In addition, it shows that augmenting the dataset, using averaging, was a suitable solution; it helps overcome the lack of big datasets for such type of biomedical signals, and helps elevate the performance. When adding more layers, the model performs better in terms of accuracy and loss regardless of the signals' length. The special structure we suggested form ML-LSTM, which was inspired by concept formation, allowed it to outperform the 1L-LSTM in terms of accuracy and loss. However, because it had much more parameters to modify it needs more training and testing time.

1L-LSTM and ML-LSTM scored an accuracy of 98.5% and 99.8% respectively. Compared to other researches, they outperformed them, although the task was to classify 53 hand gestures, while some other researches scored less even though the number of classified hand gestures was less. The models were compared to other lightweight models, and a future approach was suggested to make use of the powerful processing abilities of the LSTM models and the power friendly characteristics of the lightweight methods. These results prove that this approach is a promising one, when considering building a sEMG-based control system, by providing high performance with low complexity.

REFERENCES LIST

1. Bois-Reymond, E. D. Untersuchungen über thierische Electricität bd., 2. abth. III. Untersuchung (Fortsetzung) 1860-84 / E. D. Bois-Reymond. – Berlin: G. reimer, 1884. – 579 p.

2. Alter, R. Bioelectric control of prosthesis : technical report 446 / R. Alter. – Massachusetts institute of technology, 1966. – 86 p.
3. Bottomley, A. H. Myo-electric control of powered prostheses / A. H. Bottomley // *The Journal of Bone & Joint Surgery British Volume*. – 1965. – V. 47, No. 3. – P. 411-415.
4. The effectiveness of EMG biofeedback in the treatment of arm function after stroke / J. L. Crow [et al.] // *International disability studies*. – 1989. – V. 11, No. 4. – P. 155-160.
5. Di Girolamo, M. ost-stroke rehabilitation of hand function based on electromyography biofeedback: Doctoral dissertation / M Di Girolamo. – Italia: Politecnico di Torino, 2018. – 116 p.
6. Detecting motor unit abnormalities in amyotrophic lateral sclerosis using high-density surface EMG / Yu. Nishikawa, A. Holobar, K. Watanabe [et al.] // *Clinical Neurophysiology*. – 2022. – Vol. 142. – P. 262-272. – DOI 10.1016/j.clinph.2022.06.016. – EDN MOJLXD.
7. Visser, L. H High-resolution sonography versus EMG in the diagnosis of carpal tunnel syndrome / L. H. Visser, M. H. Smidt, M. L. Lee // *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*. – 2008. – Vol. 79, No. 1. – P. 63-67. – DOI 10.1136/JNNP.2007.115337.
8. Quadriceps Muscle Fatigue Reduces Extension and Flexion Power During Maximal Cycling / S. J. O'bryan, Ja. L. Taylor, J. M. D'amico, D. M. Rouffet // *Frontiers in Sports and Active Living*. – 2022. – Vol. 3. – DOI 10.3389/fspor.2021.797288. – EDN MAEJHT.
9. Evaluating the Ability of Congenital Upper Extremity Amputees to Control a Multi-Degree of Freedom Myoelectric Prosthesis / B. Kaluf, M. S. Gart, B. J. Loeffler, G. Gaston // *The Journal of Hand Surgery*. – 2022. – Vol. 47, No. 10. – P. 1019.e1-1019.e9. – DOI 10.1016/j.jhsa.2021.08.011. – EDN ACZMJE.
10. Interaction with a Hand Rehabilitation Exoskeleton in EMG-Driven Bilateral Therapy: Influence of Visual Biofeedback on the Users' Performance / A. Ciscal, P. Gordaliza, Ja. Pérez Turiel, Ju. C. Fraile // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23, No. 4. – P. 2048. – DOI 10.3390/s23042048. – EDN CYSEGQ.
11. Surface EMG vs. High-Density EMG: Tradeoff Between Performance and Usability for Head Orientation Prediction in VR Application / T. Sugiarto, Ch. L. Hsu, Ch. T. Sun [et al.] // *IEEE Access*. – 2021. – Vol. 9. – P. 45418-45427. – DOI 10.1109/access.2021.3067030. – EDN LJBNIJY.
12. The effects of channel number on classification performance for sEMG-based speech recognition / X. Wang, M. Zhu, H. Cui [et al.] // *Proc. IEEE EMBC*. – 2020. – P. 3102-3105.
13. The use of cranial electromyography in athletes / A. Palermo, G. Cazzato, I. Trilli [et al.] // *Oral and Implantology*. – 2024. – Vol. 16, No. 3.1suppl. – P. 506-521. – DOI 10.11138/oi163.1suppl506-521. – EDN KRHSGE.
14. Electromyography, Wavelet Analysis and Muscle Co-Activation as Comprehensive Tools of Movement Pattern Assessment for Injury Prevention in Wheelchair Fencing / Z. Borysiuk, M. Błaszczyszyn, K. Piechota, W. J. Cynarski // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2022. – Vol. 12, No. 5. – P. 2430. – DOI 10.3390/app12052430. – EDN RJDLUP.
15. EMG-Driven Machine Learning Control of a Soft Glove for Grasping Assistance and Rehabilitation / M. Sierotowicz, N. Lotti, L. Nell [et al.] // *IEEE Robotics and Automation Letters*. – 2022. – Vol. 7, No. 2. – P. 1566-1573. – DOI 10.1109/lra.2021.3140055. – EDN EBEPBD.
16. American Sign Language Translation Using Wearable Inertial and Electromyography Sensors for Tracking Hand Movements and Facial Expressions / Yu. Gu, Ch. Zheng, M. Todoh, F. Zha // *Frontiers in Neuroscience*. – 2022. – Vol. 16. – DOI 10.3389/fnins.2022.962141. – EDN XSUIEM.
17. Temporal Dilation of Deep LSTM for Agile Decoding of sEMG: Application in Prediction of Upper-Limb Motor Intention in NeuroRobotics / T. Sun, Q. Hu, P. Gulati, S. Farokh Atashzar // *IEEE Robotics and Automation Letters*. – 2021. – Vol. 6, No. 4. – P. 6212-6219. – DOI 10.1109/LRA.2021.3091698. – EDN INUTXP.
18. EMGHandNet: A hybrid CNN and Bi-LSTM architecture for hand activity classification using surface EMG signals / N. K. Karnam, A. C. Turlapaty, S. R. Dubey, B. Gokaraju // *Biocybernetics and Biomedical Engineering*. – 2022. – Vol. 42, No. 1. – P. 325-340. – DOI 10.1016/j.bbe.2022.02.005. – EDN FOWTST.
19. Gesture Recognition of sEMG Signals based on Deep Learning Framework / Ch. Yang, Ch. Zhang // *WSEAS Transactions on Signal Processing*. – 2024. – Vol. 20. – P. 78-84. – DOI 10.37394/232014.2024.20.9. – EDN JKZUIE.
20. MS-CLSTM: Myoelectric Manipulator Gesture Recognition Based on Multi-Scale Feature Fusion CNN-LSTM Network / Z. Wang, W. Huang, Z. Qi, Sh. Yin // *Biomimetics*. – 2024. – Vol. 9, No. 12. – P. 784. – DOI 10.3390/biomimetics9120784. – EDN OZKMXQ.
21. Enhanced EMG-based Gesture Recognition using Hybrid CNN-BiLSTM Architecture with Channel Attention / T. Kishore, S. S. Remabai, Ch. Retnaswamy, E. S. Paul // *Biomedical and Pharmacology Journal*. – 2025. – Vol. 18, No. December Spl Edition. – P. 315-329. – DOI 10.13005/bpj/3090. – EDN OLFBIQ.

22. Потехин, В. В. Распознавание жестов рук с использованием sEMG с Xgboost и усреднение для увеличения / В. В. Потехин, Л. Ассалама // Системный анализ в проектировании и управлении : Сборник научных трудов XXVI Международной научно-практической конференции. В 3-х частях, Санкт-Петербург, 13–14 октября 2022 года. Том Часть 2. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2023. – С. 74-88. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id23-83. – EDN QRGNBC.
23. WaveFormer: A Lightweight Transformer Model for sEMG-based Gesture Recognition / Y. Chen, M. Orlandi, P. M. Rapa [et al.] // CoRR. – 2025. – V. Abs/2506.11168. – DOI 10.48550/arXiv.2506.11168.
24. A CNN-Transformer Hybrid Network for Hand Gesture Classification based on High-Density sEMG / M. Chen, Z. Li, H. Yang, Z. G. Hou // 2024 17th International Convention on Rehabilitation Engineering and Assistive Technology, i-CREATE 2024 and World Rehabilitation Robot Convention, WRRC 2024 - Proceedings. – 2024. – DOI 10.1109/I-CREATE62067.2024.10776082.
25. Transformer-based hand gesture recognition from instantaneous to fused neural decomposition of high-density EMG signals / M. Montazerin, E. Rahimian, F. Naderkhani [et al.] // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13, No. 1. – P. 11000. – DOI 10.1038/s41598-023-36490-w. – EDN HPPBQV.
26. Han, Y. Lower Limb Movement Recognition Based on a Hybrid Deep Learning Model Using Surface Electromyography / Y. Han, Q. Tao // IEEE Access. – 2025. – DOI 10.1109/ACCESS.2025.3571395.

Поступила в редакцию 06.06.2025 г., рекомендована к печати 30.06.2025 г.

ДОЛГОСРОЧНАЯ КРАТКОСРОЧНАЯ ПАМЯТЬ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ЖЕСТОВ РУК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭЛЕКТРОМИОГРАФИИ

Ассалама Л., Потехин В.В.

Сигналы электромиографии (ЭМГ) нашли широкое применение в различных областях. Сети долгой краткосрочной памяти (LSTM) являются одним из наиболее подходящих методов для обработки ЭМГ-сигналов благодаря своей архитектуре. В данной работе были разработаны две модели LSTM: однослойная (1L-LSTM) и многослойная (ML-LSTM). Обучение проводилось на наборе данных Ninarpro-DB5, предварительно аугментированном методом усреднения. Были протестированы различные размеры входных данных. Точность моделей составила 98,5% для 1L-LSTM и 99,7% для ML-LSTM соответственно. Время тестирования находилось в диапазоне [60,240] мкс. Кроме того, было установлено, что длина сигнала не оказывает значительного влияния при использовании многослойной архитектуры.

Ключевые слова: LSTM, поверхностная электромиография (пЭМГ), распознавание жестов рук, Ninarpro-DB5, аугментация данных.

Ассалама Лара

Аспирант Высшей школы управления кибер-физическими системами ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,
Российская Федерация, г. Санкт Петербург.
E-mail: assalama.l@edu.spbstu.ru

Assalama Lara

Postgraduate Student at School of Cyber-Physical Systems of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.
Russian Federation, St. Petersburg.

Потехин Вячеслав Витальевич

кандидат технических наук, доцент Высшей школы управления кибер-физическими системами ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,
Российская Федерация, г. Санкт Петербург.
E-mail: slava.potekhin@spbstu.ru

Potekhin Viacheslav Vitalevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at School of Cyber-Physical Systems of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.
Russian Federation, St. Petersburg.

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ УКЛАДКОЙ И УПЛОТНЕНИЕМ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ

© 2025 Прокопьев А.П.

В статье представлено обоснование значимости разработки и перспективы использования гетерогенных многоагентных систем, обеспечивающих высокоавтоматизированное управление укладкой и уплотнением асфальтобетонных смесей при возведении верхних слоев покрытий автомобильных дорог. Разработаны концептуальные основы и принципы формирования таких систем. Определена архитектура интеллектуальной системы коллективного управления агентами, реализующими дорожно-строительные операции в составе гетерогенной многоагентной системы. Установлено, что центральными компонентами такой системы являются: модуль интеллектуального интерфейса человек-машина; блок планирования и распределения задач; система интеграции и анализа разнотипных сенсорных данных; модуль моделирования динамики изменения плотности и температурных параметров асфальтобетонной смеси в процессе уплотнения с применением беспилотных асфальтоукладчиков и дорожных катков с учетом атмосферных условий, а также компонент беспроводной сетевой коммуникации.

Ключевые слова: искусственный интеллект, многоагентная система, беспилотная дорожно-строительная техника, укладка и уплотнение, асфальтобетонная смесь.

Введение. Проблема увеличения срока службы асфальтобетонных (АБ) покрытий автомобильных дорог решается за счет использования высокоавтоматизированных систем управления (ВАСУ) укладкой и уплотнением АБ-смеси рабочими органами асфальтоукладчиков и дорожных катков разных типов во время строительства. Современные вызовы перед Российской Федерацией, негативно действующие на экономику страны, а также на отрасль дорожного строительства: недостаток квалифицированных кадров; низкая производительность дорожных работ; неудовлетворительное качество и долговечность АБ-покрытий, могут быть преодолены за счет использования широкозахватных асфальтоукладчиков с высокоэффективными рабочими органами, беспилотной (БП) дорожно-строительной техники. Для повышения структурной прочности асфальтобетона, на заключительном этапе уплотнения, рекомендуется использование статических или вибрационных дорожных катков тяжелого типа.

В зависимости от ширины укладываемой полосы и производительности асфальтоукладчика, на каждой захватке могут работать несколько дорожных катков разного типа и типоразмеров. Для примера, в Китае осенью 2024 г. комплектом экспериментальных дорожных машин, состоящим из БП асфальтоукладчика с широкозахватным рабочим органом и звена БП тяжелых дорожных катков выполнено устройство верхнего слоя бесшовного покрытия участка автомобильной дороги шириной 20 м и длиной 158 км. В процессе строительства использовались шесть 13-тонных двухвальцовых вибрационных дорожных катков (первая и третья группы по 3 катка) и три 30-тонных статических пневмоколесных катка (вторая группа по 3 катка) [1].

Высокоавтоматизированные беспилотные дорожные машины могут идентифицироваться как роботизированные [2-4], так как они выполняют рабочие операции по заданной программе, воспринимают окружающую среду с помощью датчиков и воздействуют на неё.

На основе таких машин создаются робототехнические системы. Так как при реализации технологического процесса комплектом роботизированных дорожных машин всегда используется несколько взаимодействующих интеллектуальных объектов (агентов), фундаментальной основой прикладного исследования является теория многоагентных систем (МАС) [5]. Учитывая специфические особенности конструкций дорожных машин и технологических процессов строительства покрытий автомобильных дорог актуальным направлением прикладного исследования в области МАС является построение многоагентных систем для группового управления беспилотными дорожными машинами, производящими укладку и уплотнение асфальтобетонной смеси. В работе [6] предложена концепция построения многоагентных робототехнических систем (МАРС) имеющая достаточно общий характер и определяющая принципы модульного устройства систем различных типов и назначения. В зарубежных странах [7, 8], а также в России [5, 9, 10] проводятся прикладные исследования технологий группового управления автономными роботами в различных областях военной техники [11], а также отраслей экономики [12].

Актуальность применения беспилотных, роботизированных дорожных машин для строительства покрытий автомобильных дорог отметил в своем выступлении на 3-й конференции «Дорожное строительство в России. Дорожно-строительная техника, оборудование и материалы: импортозамещение, технологии и производство» 23 января 2025 года руководитель Росавтодора Роман Новиков заявив, что «Одной из задач мы ставим переход на беспилотное управление транспортом и дорожными машинами при производстве дорожных работ» [13]. Разработка таких систем ведется во многих странах, в т. ч. в Российской Федерации. Компания АО «БМХ РУС» разработала инновационный отечественный дорожный каток, который может плавно увеличивать нагрузку на грунт, меняя массу [14]. Холдинг «Высокоточные комплексы», входящий в состав госкорпорации «Ростех», разрабатывает ВАСУ для асфальтоукладчиков и дорожных катков на базе программно-аппаратного комплекса (ПАК) «Прометей» (АО «ВНИИ «Сигнал», ГК «Ростех»). В 2025 г. планируется испытание беспилотных асфальтоукладчика и дорожного катка на дорожно-испытательном полигоне в Смоленской области [15].

Разработка МАС для управления укладкой и уплотнением асфальтобетонной смеси соответствует приоритетным направлениям научно-технологического развития утвержденных Указом Президента Российской Федерации от 18.06.2024 г. № 529 [16]: п. 5. Интеллектуальные транспортные и телекоммуникационные системы, включая автономные транспортные средства, а также перечню важнейших наукоемких технологий: I. Критические технологии: п. 11. Технологии микроэлектроники и фотоники для систем хранения, обработки, передачи и защиты информации; п. 14. Транспортные технологии для различных сфер применения (море, земля, воздух), в том числе беспилотные и автономные системы; II. Сквозные технологии: п. 25. Технологии искусственного интеллекта в отраслях экономики, социальной сферы (включая сферу общественной безопасности) и в органах публичной власти.

Создание АБ-покрытий автомобильных дорог имеет отраслевую специфику, обеспечивается технологическими процессами укладки и уплотнения смеси, зависит от качества и температуры АБ-смеси, а также многих других факторов. Учитывая комплексность процесса, актуальным становится разработка концептуальных основ, математических моделей и вычислительных алгоритмов для координации групповой работы, распределения задач, прогнозирования действий с целью разработки автономной дорожно-строительной техники как интеллектуальных роботизированных систем, взаимодействующих между собой на основе обмена данными, а также многоагентных структур, базирующихся на таких устройствах.

Решению этих задач способствуют разработанные Техническим комитетом по стандартизации № 164 «Искусственный интеллект» (ТК 164, <http://tc164.ru>) и утвержденные Росстандартом стандарты (начинают действовать с 1 января 2025 г.), которые регламентируют применение ИИ в строительной-дорожной технике ГОСТ Р 71750-2024 [17], ГОСТ Р 71751-2024 [18], ПНСТ 966-2024 [19], ПНСТ 967-2024 [20], ПНСТ 968-2024 [21].

Цель данной работы – разработать концепцию и принципы построения гетерогенной многоагентной системы для координированного группового управления укладкой и уплотнением асфальтобетонной смеси в процессе строительства верхних слоев дорожных покрытий автомобильных дорог.

Основные требования к функциональным возможностям МАСУУ. Инновационная технология строительства верхних слоев АБ-покрытия автомобильной дороги, построенная на основе многоагентных систем с искусственным интеллектом, предполагает использование комплектов БП дорожных машин, состоящих из высокоэффективных асфальтоукладчиков и дорожных катков тяжелого типа, которые гарантированно обеспечивают заданное качество дорожного покрытия, а также повышение точности, эффективности и безопасности рабочих процессов.

Функциональные требования к гетерогенной многоагентной системе для укладки и уплотнения (МАСУУ) АБ-смеси обусловлены необходимостью анализа решаемой производственной задачи, её разделения на совокупность технологических операций и последующего выполнения этих операций в автоматическом режиме с помощью взаимодействующих между собой агентов-исполнителей. Разработка подобных систем предполагает преодоление ряда ключевых проблем:

- обеспечение согласованного взаимодействия между автономными агентами – БП асфальтоукладчиком и БП дорожными катками, направленного на реализацию производственной задачи по укладке и уплотнению АБ-смеси;
- достижение автономности как отдельных элементов многоагентной системы, так и всей системы в целом;
- разработка эффективного человеко-машинного интерфейса, обеспечивающего оперативную постановку задачи по технологическим операциям строительства АБ-покрытия автомобильной дороги и контроль за ходом её реализации.

Перечисленные проблемы затрагивают ряд взаимосвязанных вопросов. Проблема организации взаимодействия между отдельными участниками гетерогенной МАСУУ АБ-смеси связана с решением задач [6]:

- планирование согласованных действий агентов, включая формирование и распределение соответствующих заданий между ними;
- организация информационно-логического взаимодействия и совместимости агентов как на уровне единых стандартов представления данных, протоколов обмена сообщениями, команд и указания целей, так и на уровне технической реализации каналов передачи информации.

Существующее разнообразие программно-аппаратных комплексов в системах управления различных производителей (Германия, Швеция, США, Китай, Россия) значительно затрудняет обеспечение эффективного информационного взаимодействия и совместимости бортовых систем роботизированных дорожных машин, являющихся основными компонентами многоагентной системы. Основные недостатки, возникающие из-за отсутствия унифицированного подхода к управлению в МАСУУ:

- сложности в эксплуатации и техническом обслуживании;
- применение несовместимых программных платформ;

- отсутствие универсальных ремонтных комплектов и запасных частей;
- увеличение стоимости ремонтных работ;
- ограниченные возможности модернизации оборудования.

Разработанный специалистами ВНИИ «Сигнал» программно-аппаратный комплекс «Прометей», изначально ориентированный на применение в военной и пожарной технике, может рассматриваться как один из потенциальных вариантов решения указанной задачи. Однако для обеспечения способности системы принимать обоснованные управленческие решения, соответствующие сложившейся производственной ситуации, необходимо интегрировать разнородные сенсорные данные, собираемые взаимодействующими агентами в ходе функционирования. На основе этих данных должна формироваться целостная модель внешней среды и текущей рабочей обстановки.

Разработка высокоэффективного взаимодействия между человеком и автоматизированной системой представляет собой одну из ключевых проблем при формировании гетерогенной МАСУУ. Актуальность этой задачи обусловлена необходимостью обеспечения быстрой и точной передачи управляющих команд в подсистемы управления. При этом подход к построению такого интерфейса должен одновременно учитывать два аспекта: во-первых, соответствовать требованиям эргономики и удобства эксплуатации со стороны оператора, во-вторых, гармонизировать со спецификой функционирования используемых алгоритмов и методов координации поведения автономных агентов.

Обеспечение автономности МАСУУ «является комплексной проблемой, существо которой связано с интеграцией и увязкой всей совокупности подходов и решений, регламентирующих построение человеко-машинного интерфейса, организацию целесообразного взаимодействия между отдельными агентами в процессе их совместного функционирования, обобщение разнородной сенсорной и командной информации для формирования единой модели внешней среды и рабочей обстановки, а также обеспечение собственно автономности самих агентов» [6].

Стратегия группового управления в МАСУУ. Инновационный технологический процесс строительства АБ-покрытий автомобильных дорог предусматривает определенную организацию дорожно-строительного потока:

- БП асфальтоукладчик задает постоянную скорость движения «потока» в диапазоне от 2 м/мин до 5 м/мин (в российских технологиях), обеспечивая непрерывно приемку АБ-смеси, транспортирование, распределение по ширине рабочего органа, предварительное уплотнение, а также нивелирование поверхности будущего АБ-покрытия автомобильной дороги;

- БП дорожные катки разных типов (вибрационные, статические, гладковальцовые, пневмоколесные, средние, тяжелые) уплотняют АБ-смесь до нормативных показателей плотности повторяющимися проходами по одному следу, число которых зависит от уплотненности АБ-смеси после прохода асфальтоукладчика.

Необходимое количество катков рекомендуется рассчитывать из условия, что каждый каток должен успеть сделать минимум 4 прохода по одному следу. Это зависит от ширины укладываемой полосы и производительности катка. На каждой захватке в зависимости от ширины укладки могут работать параллельно 1, 2 или 3 катка одного типоразмера. Как правило, в створе шириной $3,5 \div 5$ метров эффективно работает 1 каток, при ширине 5 и более метров (до 8 м) рекомендуется применять два катка работающих параллельно, при ширине створа от 8 до 12 метров – 3 катка и т.д. [22].

Плотность АБ-смеси определяет ряд механических характеристик дорожного покрытия автомобильной дороги, позволяющих оценить эксплуатационные свойства асфальтобетона, в т.ч. срок службы покрытия.

Таким образом, в технологическом процессе дорожного строительства на основе многоагентной системы, в зависимости от ширины АБ-покрытия, при минимальной ширине рабочего органа используется комплект дорожных машин, состоящий из БП асфальтоукладчика (агент № 1) и дорожный каток тяжелого типа (агент № 2). Следовательно, в любом проекте строительства существует задача группового управления роботизированной дорожно-строительной техники. В зависимости от ширины создаваемого АБ-покрытия задача управления усложняется.

Проблема группового управления роботами рассмотрена в работах [5, 23]. В рассматриваемом объекте исследования присутствуют разнотипные комплекты групп роботизированных дорожных машин, состоящие из гомогенных групп – агентов дорожных катков одного типа, а также гетерогенной группы – агента(ов) асфальтоукладчика(ов) и агента(ов) дорожного(ых) катка(ов).

Групповое управление в составе гетерогенной МАСУУ предполагает разработку и применение стратегий поведения отдельных агентов, направленных на достижение коллективной цели с учетом оптимальности, определенной через заданный критерий гомогенных групп.

Среди существующих методов решения задач координации различных групп агентов выделяются следующие [5, 23]:

- централизованный подход;
- децентрализованный подход, предусматривающий автономное принятие решений каждым агентом;
- гибридная модель, сочетающая элементы иерархического и децентрализованного способов.

Эффективность применения конкретной стратегии определяется спецификой решаемой задачи, уровнем требуемого контроля за функционированием агентов, динамикой внешней среды и техническими возможностями обеспечения устойчивой передачи данных на удаленные расстояния с использованием современных технологий беспроводной связи. Для информационного взаимодействия БП дорожно-строительной техники в гетерогенных комплектах применяются беспроводные сети стандарта Wi-Fi и протоколы ТСР/IP. Гармонизация информационной среды гетерогенной МАСУУ достигается за счет интеграции сетевой инфраструктуры с программно-аппаратными модулями навигационных систем и коммуникационных устройств. Предпочтение этим технологиям отдается благодаря их массовой доступности, совместимости оборудования и высокой пропускной способности каналов передачи данных.

Концепция и принципы построения гетерогенной МАСУУ. Надежность и производительность гетерогенной МАСУУ определяются функциональными характеристиками групп агентов, входящих в её структуру. Исходя из этого, актуальной задачей становится оптимизация управления группой агентов, направленная на обеспечение их автономности. Это позволяет минимизировать затраты программно-технических ресурсов, необходимых для координации взаимодействия, а также облегчить формулирование групповых задач со стороны оператора МАСУУ. Создание беспилотных дорожных машин требует реализации высокого уровня адаптивности, надежности и качества функционирования в условиях частичной неопределенности внешней среды. Эти требования предполагают совершенствование методов адаптивного управления, включая технологии искусственного интеллекта для обработки данных и принятия решений.

Исследователи и ученые как отечественных [5, 9, 10, 24], так и международных [7, 8] научно-исследовательских организаций активно занимаются разработками ИСУ. Автономные транспортные средства, представляющие собой многоуровневые объекты регулирования, включают иерархически взаимосвязанные компоненты, реализующие технологии искусственного интеллекта. Эти модули обеспечивают выполнение комплексного анализа окружающей среды, формирование стратегий поведения, проектирование алгоритмов и синтез управляющих решений, соответствующих заданным критериям оптимальности. Архитектура ИСУ для гетерогенной МАСУУ представлена на рис. 1. Её реализация основана на иерархическом подходе и включает три функциональных уровня: стратегический, тактический и исполнительный, а также комплекс информационно-измерительных средств [25, 26].

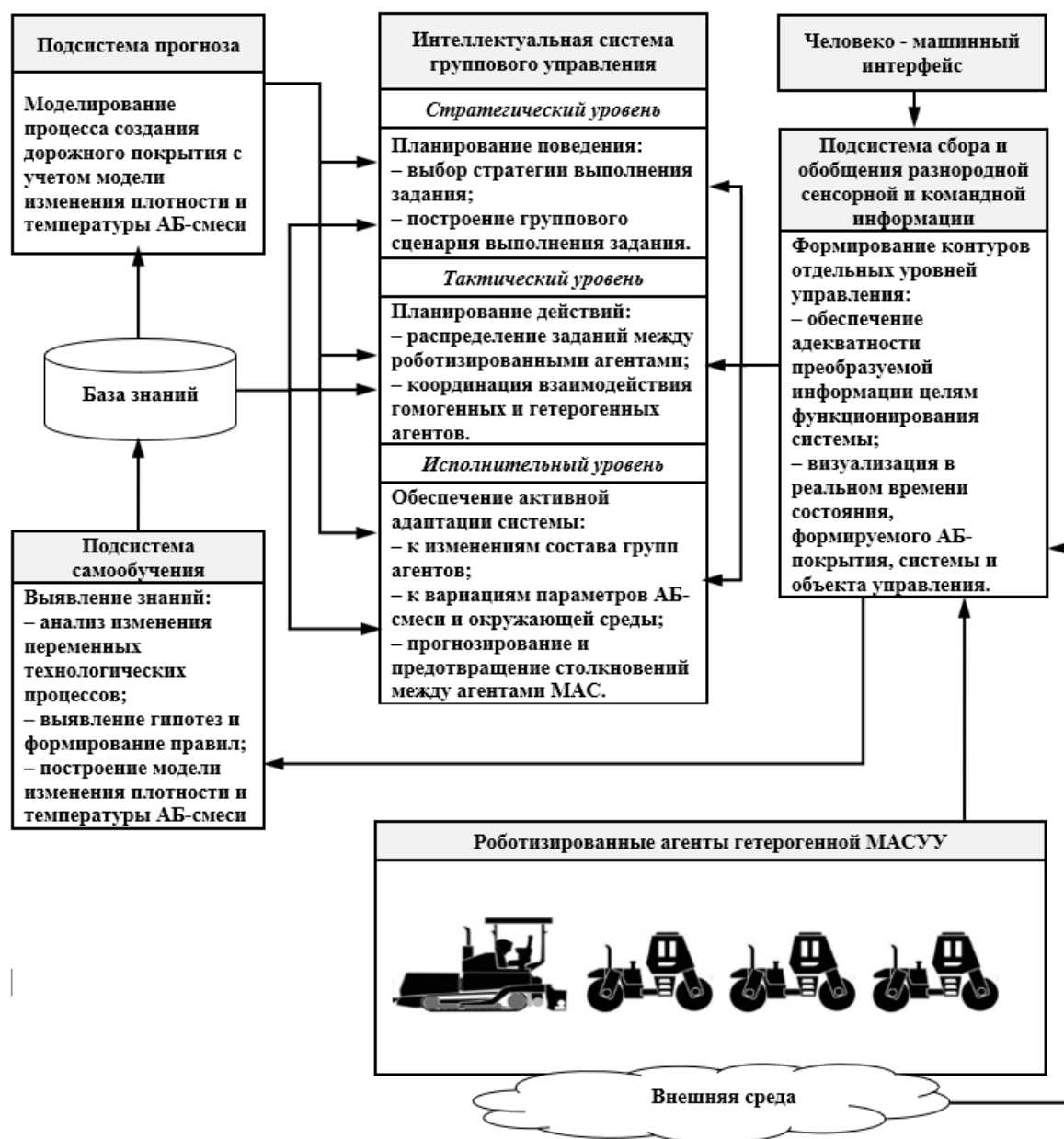


Рис. 1. Интеллектуальная система управления гетерогенной МАСУУ АБ-смеси

Устойчивое функционирование каждого структурного элемента ИСУ обеспечивается за счет применения технологий имитационного моделирования, динамического обновления и верификации баз знаний. В число интеллектуальных методов входят четыре подхода к формализации знаний [27]: экспертные системы; нейросетевые архитектуры; нечеткая логика и ассоциативная память. Актуализация знаний может осуществляться через интерфейс с экспертами или автономного обучения. Аналитическая обработка информации может выполняться как посредством ситуационного подхода, так и через применение эффективных алгоритмов принятия решений. Последние включают построение модели взаимодействия агентов с АБ-смесью и прогнозирование сценариев развития событий в режиме онлайн [28, 29].

На основе анализа нормативных требований, предъявляемых к функционированию МАС, разработаны основные принципы, на которых базируется создание гетерогенной МАСУУ:

- гармонизация целевых установок гомогенных групп агентов-исполнителей в составе гетерогенной многоагентной технологии;
- соответствие функциональных и интеллектуальных характеристик гетерогенной группы агентов сложности задач по распределению и уплотнению АБ-смеси;
- централизация информационных потоков в едином цифровом пространстве системы, обеспечивающая взаимодействие гетерогенных агентов;
- масштабируемость сетевой инфраструктуры МАС, поддерживающей целостность информационной среды при реализации различных проектов силами гетерогенной группы агентов;
- совместимость логических и коммуникационных протоколов между агентами гетерогенной системы.

Реализация принципа согласованности целевых функций однородных агентов в составе гетерогенной МАС предполагает использование адаптированных алгоритмов интерфейса взаимодействия оператора и системы для определения заданий и общей цели, а также унифицированной стратегии координации действий однородных групп агентов, включая распределение задач и планирование операций между агентами-исполнителями.

Обеспечение соответствия функциональных и интеллектуальных параметров агентов требованиям управления процессами укладки и уплотнения АБ-смеси осуществляется на двух уровнях: на этапе предварительного отбора потенциальных исполнительных модулей и при проектировании программно-аппаратного обеспечения их бортовых управляющих комплексов.

Целостность информационной среды гетерогенной МАС реализуется через организацию двустороннего обмена полным массивом критичных данных между разнородными агентами. Это достигается интеграцией современных сетевых технологий и задействованием программно-аппаратных комплексов, обеспечивающих устойчивую передачу информации.

Адаптивная сетевая инфраструктура гетерогенной МАС предусматривает возможность индивидуальной реконфигурации под типы централизованного, децентрализованного или гибридного управления. Такой подход гарантирует координированное информационно-логическое взаимодействие разнородных элементов при использовании разнообразных методик коллективного регулирования.

Взаимная совместимость однородных агентов в составе гетерогенной МАС обеспечивается унифицированным протоколом команд, стандартизацией форматов данных и унификацией вычислительных ресурсов. Это позволяет синхронизировать обработку информации и формирование управленческих решений на всех уровнях системы.

Применение указанных принципов при проектировании многоагентной системы управления укладкой и уплотнением АБ-смесей МАСУУ обеспечивает её автономное функционирование в условиях неполной информации. Система способна адаптироваться к изменяющимся параметрам внешней среды, включая температуру, скорость ветра и специфику используемых дорожных материалов.

Функциональная архитектура предложенной модели гетерогенной МАСУУ включает следующие ключевые модули, см. рис. 2:

- интерактивный интерфейс человека и машины с искусственным интеллектом, обеспечивающий реализацию оперативного описания общей задачи формирования АБ-покрытия, верификацию корректности ее постановки в симуляционном режиме, спецификацию параметров АБ-смеси, температурных условий и скорости движения окружающего воздуха в зоне производственного функционирования, а также отражение телеметрических и сенсорных данных, характеризующих работу однородных и разнородных групп агентов-исполнителей и их кооперативное взаимодействие;

- планирования операций и генерации задач на основе комплексной оценки поставленной цели строительства и промежуточных результатов выполнения отдельными агентами-исполнителями;

- распределения текущих заданий между агентами-исполнителями с учетом их ресурсного потенциала, динамических условий взаимодействия с дорожным материалом и специфики окружающей инфраструктуры;

- агрегирования данных переменных сенсорных и командных сигналов от агентов для формирования модели уплотненности и температуры поверхности АБ-смеси по ширине укладываемого покрытия автомобильной дороги, соответствующей текущей ситуации;

- формирования модели температуры поверхности и уплотненности АБ-смеси через декодирование интегрированных данных переменных, поступающих от агентов МАСУУ, а также ее анализа для идентификации ключевых характеристик текущей обстановки.



Рис. 2. Функциональная схема структуры гетерогенной МАСУУ

Внешняя среда на рис. 2 включает характеристики АБ-смеси (марка, температура, плотность, толщина) и параметры атмосферного воздуха (температура, влажность воздуха, скорость ветра).

Заключение. Предложенная в работе концепция построения гетерогенной МАС для координированного группового управления процессами укладки и уплотнения асфальтобетонной смеси при строительстве верхних слоев дорожных покрытий определяет ключевые направления их реализации. К ним относятся: разработка стратегий планирования эффективных действий; распределение задач между агентами-исполнителями на основе доступных ресурсов; обеспечение сетевой коммуникации и формирование адаптивной модели внешней среды, а также организация интерфейса человека и машины. Дальнейшая разработка методов и алгоритмов позволит достичь унификации программного обеспечения, совместимого с перспективными образцами гетерогенных МАСУУ, допускающими как централизованный, так и децентрализованный подходы к управлению. Выбор архитектуры системы зависит от специфики решаемой задачи: например, при использовании широкозахватного асфальтоукладчика предпочтительна децентрализованная структура. Также учитываются требования к автономности роботизированного комплекса, временным и материальным затратам на настройку и тестирование программно-алгоритмического обеспечения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. В Китае беспилотники проложили 158 километров дороги без помощи людей [Электронный ресурс]. – URL: https://journal.totdom.com/news/v_kitae_bespilotniki_prolozhili_158_kilometrov_dorogi_bez_pomoshchi_lyudey/ (дата обращения 14.05.2025).
2. Dynamic hyperparameter tuning-based path tracking control for robotic rollers working on earth-rock dam under complex construction conditions / Sh. Guan, J. Wang, X. Wang [et al.] // *Automation in Construction*. – 2022. – Vol. 143. – P. 104576. – DOI 10.1016/j.autcon.2022.104576. – EDN ARLFSN.
3. Concrete paving productivity improvement using a multi-task autonomous robot / D. Castro-Lacourte [et al.] // *24th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2007)*. – 2007. – P. 224-228. – DOI 10.22260/ISARC2007/0040.
4. Fully Autonomous Robot for Paving Operations / L. S. Bryson [et al.] // *Proceedings of Construction Research Congress (ASCE 2005)*. – 2005. – P. 1-10. – DOI [https://doi.org/10.1061/40754\(183\)37](https://doi.org/10.1061/40754(183)37).
5. Каляев, И. А. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян. – М.: Изд-во Физматлит, 2009. – 280 с. – ISBN 978-5-9221-1141-6.
6. Манько, С. В. Концепция построения мультиагентных робототехнических систем / С. В. Манько, В. М. Лохин, М. П. Романов // *Вестник МГТУ МИРЭА*. – 2015. – № 3-1(8). – С. 156-165. – EDN ULXGJF.
7. Yasuda, T. Multi-robot systems: trends and development / T. Yasuda. – *InTech*, 2011. – 598 p. – ISBN 978-953-307-425-2.
8. Review on state-of-the-art dynamic task allocation strategies for multiple-robot systems / S. N. Seenu, R. M. Kuppan Chetty, M. M. Ramya, M. N. Janardhanan // *Industrial Robot*. – 2020. – V. 47(6). – P. 929 - 942. – DOI <https://doi.org/10.1108/IR-04-2020-0073>.
9. Пшихопов, В. Х. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / В. Х. Пшихопов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 305 с. – ISBN 978-5-9221-1674-9.
10. Принципы построения и проблемы разработки мультиагентных робототехнических систем / И. М. Макаров, В. М. Лохин, С. В. Манько, М. П. Романов // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2012. – № 3. – С. 11-16. – EDN OUWMRT.
11. Каркищенко, А. Н. Градиентный метод формирования строя подводных аппаратов на основе вероятностного функционала / А. Н. Каркищенко // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2025. – Т. 26, № 4. – С. 209-219. – DOI 10.17587/mau.26.209-219. – EDN PGQJZW.
12. Групповое управление роботами в задачах разбора завалов и демонтажа объектов атомной отрасли / С. В. Манько, С. А. К. Диане, В. М. Лохин, А. К. Новосельский // *Экстремальная робототехника*. – 2017. – № 1(28). – С. 302-311.

13. Дорожные машины: перспективы и вызовы [Электронный ресурс]. – URL: <https://rosavtdor.gov.ru/press-center/magazines/arhiv-nomerov-zhurnala-dorogi-rossii-xxi-veka-za-2025-god> (дата обращения 14.05.2025).
14. В России разработали инновационный дорожный каток [Электронный ресурс]. – URL: <https://tnews.ru/innovation-news/v-rossii-razrabotali-innovacionnyj-dorozhnyj-katok/> (дата обращения 14.05.2025).
15. В России протестируют технологию укладки асфальта с помощью беспилотной техники [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.itsjournal.ru/news/v-rossii-protestiruyut-tehnologiyu-ukladki-asfalta-s-pomoshchyu-bespilotnoy-tehniki> (дата обращения 14.05.2025).
16. Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий: Указ Президента Российской Федерации от 18.06.2024 г. № 529.
17. ГОСТ Р 71750-2024. Технологии искусственного интеллекта в строительно-дорожной технике. Термины и определения: национальный стандарт Российской Федерации: введен 2025-01-01. – М.: Российский институт стандартизации, 2024 – 7 с.
18. ГОСТ Р 71751-2024. Технологии искусственного интеллекта в строительно-дорожной технике. Варианты использования: национальный стандарт Российской Федерации: введен 2025-01-01. – М.: Российский институт стандартизации, 2024 – 10 с.
19. ПНСТ 966-2024. Алгоритмы искусственного интеллекта для обнаружения и идентификации препятствий строительно-дорожной техники. Методы испытаний: предварительный национальный стандарт Российской Федерации: введен 2025-01-01. – М.: Российский институт стандартизации, 2024 – 11 с.
20. ПНСТ 967-2024. Алгоритмы искусственного интеллекта для решения задач ландшафтной навигации строительно-дорожной техники. Методы испытаний: предварительный национальный стандарт Российской Федерации: введен 2025-01-01. – М.: Российский институт стандартизации, 2024 – 11 с.
21. ПНСТ 968-2024. Алгоритмы искусственного интеллекта, используемые в управлении движением строительно-дорожной техники. Общие положения: предварительный национальный стандарт Российской Федерации: введен 2025-01-01. – М.: Российский институт стандартизации, 2024 – 7 с.
22. Ушаков, В. В. Устройство асфальтобетонных покрытий при пониженной температуре воздуха / В. В. Ушаков, В. А. Ярмолинский. – М.: МАДИ, 2018. – 104 с.
23. Смешанные стратегии группового управления в многоагентных робототехнических системах / И. М. Макаров, В. М. Лохин, С. В. Манько [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 3(128). – С. 8-13.
24. Прокопьев, А. П. Методологический подход к созданию программно-аппаратного комплекса автоматизированной системы контроля плотности для асфальтоукладчиков / А. П. Прокопьев, Ж. И. Набижанов, А. А. Большаков // Программная инженерия. – 2025. – Т. 16, № 7. – С. 358-365. – DOI 10.17587/prin.16.358-365. – EDN NGYLVU.
25. Прокопьев, А. П. Методы и средства автоматизированного контроля плотности асфальтобетонной смеси для управления укладчиком в процессе строительства покрытия автомобильной дороги / А. П. Прокопьев, А. А. Большаков // Программная инженерия. – 2025. – Т. 16, № 2. – С. 100-112. – DOI 10.17587/prin.16.100-112. – EDN ETXKWG.
26. Интеллектуальные системы автоматического управления / под ред. И. М. Макарова, В. М. Лохина. – М.: Физматлит, 2001. – 576 с.
27. Макаров, И. М. Принципы построения интеллектуальных регуляторов и систем управления средствами ВВТ / И. М. Макаров // Известия ТРТУ. – 2006. – № 3(58). – С. 3-7.
28. Николенко, С. И. Самообучающиеся системы / С. И. Николенко, А. Л. Тулупьев. – М.: МЦНМО, 2009. – 288 с.
29. Autonomous Intersection Management for Semi-Autonomous Vehicles [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.cs.utexas.edu/~aim/papers/BookChapter14-au.pdf> (дата обращения 27.05.2025).

Поступила в редакцию 24.06.2025 г., рекомендована к печати 08.07.2025 г.

**HETEROGENEOUS MULTI-AGENT SYSTEM FOR OPTIMIZING ASPHALT CONCRETE MIX
PAVING AND COMPACTION PROCESSES**

Prokopen A.P.

The article presents a rationale for the importance of developing and prospects for utilising heterogeneous multi-agent systems that provide highly automated control over laying and compaction of asphalt mixtures in constructing upper layers of road pavements. Conceptual foundations and principles for the formation of such systems have been developed. The architecture of an intelligent collective management system for agents performing road construction operations within a heterogeneous multi-agent system has been defined. It is established that the central components of such a system include the following key elements: an intelligent human-machine interface module; a task planning and distribution unit; a system for integrating and analysing heterogeneous sensor data; a module for simulating the dynamics of density and temperature parameter changes in asphalt mixtures during compaction using unmanned pavers and road rollers, taking into account atmospheric conditions; and a wireless network communication component.

Keywords: artificial intelligence, multi-agent system, unmanned road-building equipment, paving and compaction, asphalt concrete mixture.

Прокопьев Андрей Петрович

кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры строительных материалов и технологии
строительства ФГАОУ ВО «Сибирский
федеральный университет»,
Российская Федерация, г. Красноярск.
e-mail: prok1@yandex.ru

Prokopen Andrei Petrovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at Department of Building
Materials and Construction Technology of Siberian
Federal University,
Russian Federation, Krasnoyarsk.

ЭЛЕМЕНТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В АСНИ РАДИОСИГНАЛОВ

© 2025 *Третьяков И.А., Данилов В.В.*

В настоящей работе рассматриваются элементы вычислительных средств и их структурные схемы, необходимые для реализации алгоритмов интегральных преобразований в автоматизированных системах научных исследований и обработки радиосигналов. Показана возможность реализации существующих интегральных преобразований радиосигналов посредством оптических информационных технологий.

Ключевые слова: ИИС, АСНИ, обработка радиосигналов, преобразование Фурье, оптические информационные технологии, оптический процессор.

Введение. В условиях стремительного развития технологий и увеличения объемов, плотности и сложности сигналов, используемых в радиоэлектронных системах специального назначения, постоянно требуется совершенствование специальных автоматизированных информационно-измерительных систем (АИИС) их обнаружения и распознавания, а также специализированных автоматизированных систем для их научного исследования (АСНИ) [1-7]. Одним из ключевых инструментов для анализа и обработки радиосигналов являются интегральные преобразования, позволяющие эффективно извлекать полезную информацию из множества источников. Эти методы широко применяются в различных областях — телекоммуникации и связь, контроль радиообстановки (радиолокация, радиоидентификация, радиоразведка, радиомониторинг), медицина, экология и т.д.

Современные требования по производительности специализированных АИИС составляют: системы радиоэлектронной борьбы/поддержки - 10^{10} оп/с, системы связи – $2 \cdot 10^9$ оп/с, системы радиоразведки – 10^9 оп/с, радиолокационные системы – $5 \cdot 10^8$ оп/с. Развитие оптических информационных технологий, одно из направлений решения проблемы. Широкие перспективы для совершенствования и создания устройств оптимальной обработки таких радиосигналов открывают оптические информационные технологии [7-9]. Основными достоинствами когерентных оптических методов обработки данных являются: большая информационная емкость, многоканальность, высокое быстродействие.

В данной статье рассматриваются элементы вычислительных средств (ВС) и их структурные схемы, необходимые для реализации алгоритмов интегральных преобразований в АСНИ и обработки радиосигналов. Важность выбора эффективных вычислительных средств не только увеличивает производительность обработки радиосигналов, но и обеспечивает высокую степень точности и надежности получаемых результатов.

Особенности ввода радиосигналов в вычислительные средства специальных АИИС. В таблице 1 представлен список технических характеристик вычислительных средств систем радиотехнической разведки (СРТР) и систем предупреждения о радиолокационном облучении (СПРО), соответствующих критерию «перспективные» [10-14]. На сегодняшний день такие устройства, объединяющие все указанные характеристики в совокупности, не воплощены [11, 12].

Таблица 1. Требования к вычислительным средствам СРТР и СПРО

Параметр	Блоки ВС СРТР, работающие в диапазоне частот, ГГц					Блоки ВС СПРО в диапазоне, ГГц
	0,03-0,05	0,05-0,1	0,1-0,2	0,2-0,4	0,4-18(40)	0,4-18(40)
Чувствительность при соотношении (сигнал/шум)/N=13 дБ, дБ·мВт	-120	-120	-90	-90	-90	-60
Разрешающая способность по частоте, МГц	0,03	0,05	0,1	0,2	1	2
Ширина одновременно анализируемых частот, МГц	20	50	100	200	500-2000	10
Динамический диапазон, дБ	70	70	60	50	40-50	50
Разрешающая способность по амплитуде, дБ	1	1	1	1	1	3
Разрешающая способность по времени, мкс	10	5	5	5	<10	<0,2

С момента массового внедрения в такие вычислительные средства сложных радиосигналов с высоким значением их важной характеристики – базы ($B = \Delta f T$, Δf – полоса частот, T – длительность), прошло более четырех десятилетий. За этот период существенно повысилось значение базы, а технологии формирования и обработки сигналов стали более совершенными. В настоящее время в большинстве случаев устройства обработки радиосигналов основаны на электронных процессорах быстрого преобразования Фурье (БПФ), в которые информация поступает через тракты аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Такие процессоры осуществляют вычисление дискретного преобразования Фурье конечной последовательности выборок s_k радиосигнала $s(t)$ следующим образом:

$$S_k = \sum_{n=0}^{N-1} s_n e^{-j(2\pi nk)/N}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1.$$

Это дает возможность обрабатывать данные в спектральной области, что имеет ряд преимуществ по сравнению с обработкой во временной области. При обработке радиосигналов ключевой характеристикой БПФ-процессоров является быстродействие. Хотя и существуют разработки, позволяющие в лабораторных условиях осуществлять обработку сложных радиосигналов в диапазоне более 300 МГц, констатировать об их серийном производстве рано. Применение для ввода информации АЦП, на основе специализированных интегральных схем с высокой плотностью активных элементов на единицу площади кристалла, четко определяет (ограничивает) функциональную направленность вычислительного устройства. Такие устройства зачастую производятся мелкими сериями и имеют высокую стоимость.

Для существенного увеличения быстродействия при обработке радиосигналов требуется постоянные усилия со стороны разработчиков, анализ существующих и поиск новых физических явлений, потенциально пригодных для создания устройств обработки радиосигналов. Одним из потенциальных решений этой задачи является переход к совершенно другой элементной базе, например – базе на принципах функциональной электроники, в т. ч. оптических информационных технологий [15-18].

Применение оптического процессора в вычислительных системах обработки радиосигналов. Общеизвестно, что основным компонентом оптических систем, предназначенных для обработки изображений, является оптический процессор (ОП). Возможности применения ОП в качестве устройства для спектрального и корреляционного анализа изображений показаны в работах [19, 20]. В таких системах информация вводится в ОП через транспарант, на котором изображение (оптический сигнал) создается посредством фотографических методов. Это изображение, находясь на пути когерентного излучения, по мере распространения излучения в свободном пространстве направляется в ОП, при этом транспарант выполняет две базисные математические операции. Первая операция заключается в умножении амплитуды световой волны на функцию пропускания транспаранта $M(x, y)$:

$$A'(x, y) = A(x, y)M(x, y) = a(x, y)a_m(x, y)e^{i[\varphi(x, y) + \varphi_m(x, y)]},$$

где a_m - функция пропускания транспаранта, φ_m - сдвиг фазы световой волны, обусловленный ее прохождением непосредственно через транспарант. Вторая базисная операция - преобразование Френеля, представленное следующим образом:

$$A'(x, y) = C_\phi Fr\{A(x, y)\},$$

где C_ϕ – множитель, не зависящий от $A(x, y)$, Fr – оператор Френеля. Преобразование Френеля происходит в пространственном слое, находящемся за транспарантом, и возникает в результате дифракции света [21, 22]. Таким образом, этот слой выступает в роли процессора, выполняющего математическую операцию, эквивалентную преобразованию Френеля:

$$A(x, y, L) = a_0 \frac{\exp[ikL]}{i\lambda L} \exp\left[i\frac{k}{2L}(x^2 + y^2)\right] Fr\{t(x_0, y_0)\}. \quad (1)$$

Результатом преобразования Френеля (1) является комплексная функция:

$$Fr\{A_0(x_0, y_0)\} = a_\phi(x, y, L)e^{i\varphi_\phi(x, y, L)}.$$

Вывод результатов этой обработки осуществляется посредством квадратичного фотодетектора с заданной интенсивностью $I(x, y, L) = |A(x, y, L)|^2$. Таким образом результат преобразуется согласно:

$$I(x, y, L) = a_\phi^2(x, y, L) / (\lambda^2 L^2).$$

Структура оптического процессора для реализации двумерных интегральных преобразований Фурье. На рисунке 1 показана оптическая схема, позволяющая осуществлять двумерное интегральное преобразование Фурье.

В соответствии с (1) и рис. 1, комплексная амплитуда света $A(x, y, L)$ на расстоянии L от транспаранта равна [23]:

$$A(x, y, L) = a_0 \frac{\exp(ikL) \exp\left[i\frac{k}{2L}(x^2 + y^2)\right]}{i\lambda L} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} t(x_0, y_0) \exp\left[i\frac{k}{2L}(x_0^2 + y_0^2)\right] \cdot \exp\left[-i2\pi\left(\frac{x}{\lambda L}x_0 + \frac{y}{\lambda L}y_0\right)\right] dx_0 dy_0. \quad (2)$$

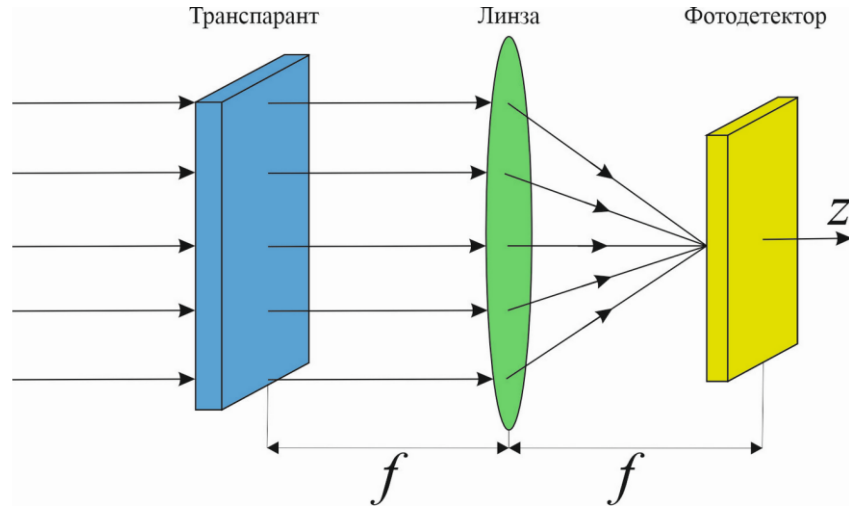


Рис. 1. Структурная схема оптического процессора, реализующего двумерное интегральное преобразование Фурье

Введя пространственные координаты X, Y перепишем выражение (2) в виде:

$$A(x, y, L) = a_0 \frac{\exp(ikL) \exp[i \frac{k}{2L} (x^2 + y^2)]}{i\lambda L} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} t(x_0, y_0) \exp[-i2\pi(Xx_0 + Yy_0)] dx_0 dy_0, \quad (3)$$

где
$$X = \frac{x}{\lambda L}; Y = \frac{y}{\lambda L}.$$

Преобразование (3) согласно [19], является интегральным преобразованием Фурье, в области Фраунгофера, т.е. при $z \gg k(x_0^2 + y_0^2)_{\max}$, и может быть представлено в виде:

$$A(x, y, L) = a_0 (i\lambda L)^{-1} \exp(ikL) \exp[i \frac{k}{2L} (x^2 + y^2)] F\{t(x_0, y_0)\} = \exp(ikL) \exp[i \frac{k}{2L} (x^2 + y^2)] (i\lambda L)^{-1} F\{A_0(x_0, y_0)\},$$

где F - оператор Фурье. Если расстояния между транспарантом, линзой и плоскостью наблюдения определены в соответствии с рис. 1, то комплексная амплитуда радиосигнала будет представлять собой произведение фазового множителя световой волны и Фурье-преобразования функции пропускания транспаранта, которая может быть выражена следующим образом:

$$A(x, y) = a_0 \frac{\exp(2ikf)}{i\lambda f} F\{t(x_d, y_d)\} = a_0 \frac{\exp(2ikf)}{i\lambda f} T\left(\frac{x}{\lambda f}, \frac{y}{\lambda f}\right).$$

Таким образом, для реализации алгоритма интегральных преобразований Фурье над изображением, вводимым в оптическую систему, необходим транспарант, предназначенный для ввода информации в оптическое (лазерное) излучение. Математические интегральные преобразования осуществляются, как правило, в пространственном слое и посредством линз, а скорость их выполнения определяется скоростью прохождения когерентного оптического излучения (лазерного пучка), которое несет исходные данные, вводимые транспарантом, что соответствует скорости распространения света. Вывод информации (результатов интегрального преобразования) осуществляется фотодетектором.

Структура оптического процессора для реализации двумерного интегрального преобразования свертки. На рисунке 2 показана оптическая схема, позволяющая осуществлять интегральные преобразования свертки двух функций.

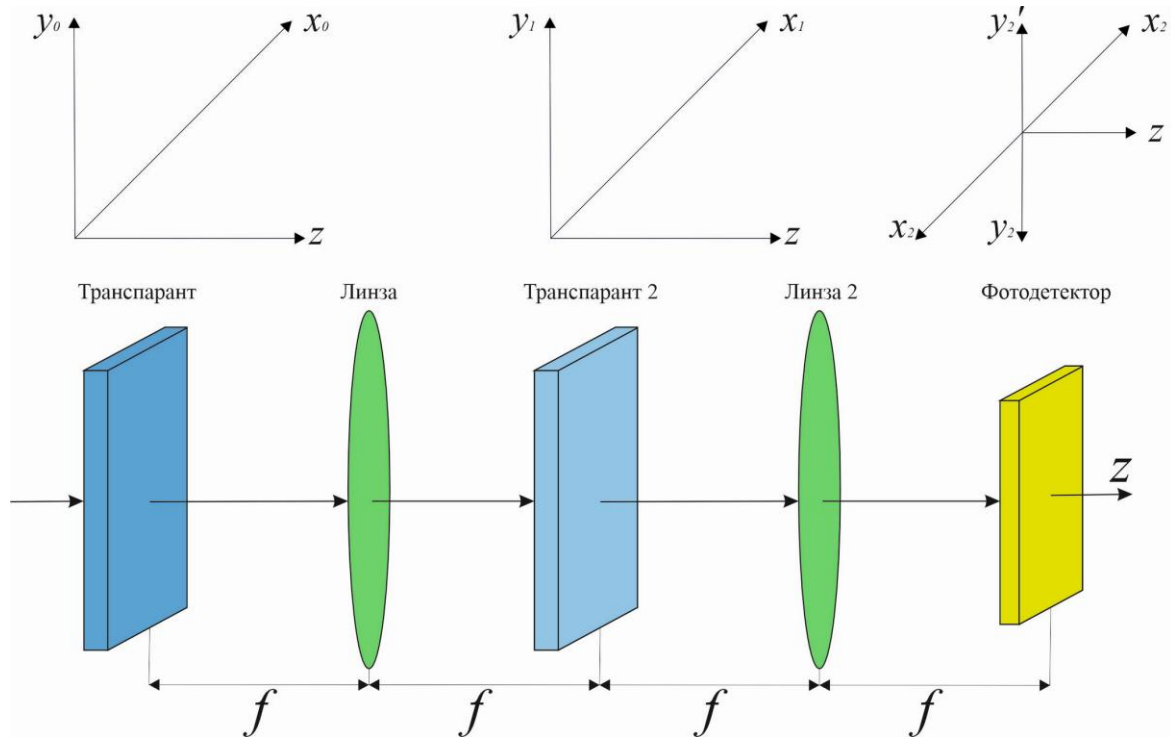


Рис. 2. Структурная схема оптического процессора, реализующая операцию свертки

В соответствии с рис. 2 в задней фокальной плоскости второй линзы происходит трансформация комплексной амплитуды, пропорциональная преобразованию Фурье:

$$A_1(x_1, y_1) = \frac{\exp(2ikf)}{i\lambda f} F\{a_0 t(x_0, y_0)\} = a_0 \frac{\exp(2ikf)}{i\lambda f} T\left(\frac{x_1}{\lambda f}, \frac{y_1}{\lambda f}\right). \quad (4)$$

Далее происходит аналогичное преобразование волны $A_1(x_1, y_1)$:

$$A_1(x_2', y_2') = \frac{\exp(2ikf)}{-\lambda^2 f^2} F\{A_1(x_1, y_1)\}. \quad (5)$$

Подставив (4) в (5), получим:

$$A_1(x_2', y_2') = \frac{\exp(4ikf)}{-\lambda^2 f^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T\left(\frac{x_1}{\lambda f}, \frac{y_1}{\lambda f}\right) \exp\left[-i2\pi\left(\frac{x_2'}{\lambda f} x_1, \frac{y_2'}{\lambda f} y_1\right)\right] dx_1 dy_1. \quad (6)$$

Заменив переменные $X = \frac{x_1}{\lambda f}$ и $Y = \frac{y_1}{\lambda f}$, запишем (6) в виде:

$$\begin{aligned} A_1(x_2', y_2') &= -a_0 \exp(4ikf) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T(X, Y) \exp[-i2\pi(Xx_2', Yy_2')] dXdY = \\ &= a_0 l \exp(4ikf) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T(X, Y) \exp\{(i2\pi)[X(-x_2') + Y(-y_2')]\} dXdY. \end{aligned} \quad (7)$$

Интеграл в (7), определяет обратное преобразование Фурье [23], поэтому:

$$A_2(x_2', y_2') = -a_0 \exp(4ikf) t(-x_2', -y_2').$$

Если перейти в выходной плоскости рассматриваемой оптической системы к системе координат (x_2, y_2) (рис. 2), которая повернута на 180 градусов относительно системы (x_2', y_2') , становится очевидным, что такая оптическая схема способна осуществлять обратное преобразование Фурье:

$$t(x_2, y_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T(X, Y) \exp[i2\pi(Xx_2 + Yy_2)] dXdY.$$

Транспарант, находящийся в плоскости пространственных частот (рис. 2) и имеющий функцию пропускания $H(x_1, y_1)$, выступает в качестве фильтра пространственных частот. За данным фильтром комплексное поле волны можно описать как произведение функции $A_1(x_1, y_1)$, определяемой выражением (4), и функцией пропускания самого фильтра (транспаранта) $H(x_1, y_1)$:

$$A_2(x_2, y_2) = \frac{\exp(2ikf)}{i\lambda f} F^{-1}\{A_1(x_1, y_1)H(x_1, y_1)\}. \quad (8)$$

Подставив (4) в (8), получим:

$$A_2(x_2, y_2) = -a_0 \exp(4ikf) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T(X, Y) H(X, Y) \exp[i2\pi(Xx_2 + Yy_2)] dXdY,$$

где $H(X, Y) = H(x_1, y_1)$ - передаточная функция фильтра. Если Фурье – образу $T(X, Y)$ соответствует функция $t(x_2, y_2)$ в выходной плоскости, то функции $H(X, Y)$ можно привести в соответствие функцию:

$$h(x_2, y_2) = \lambda f \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T(X, Y) \exp[i2\pi(Xx_2 + Yy_2)] dXdY.$$

Согласно теореме о свертке [24]:

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T(X, Y) H(X, Y) \exp[i2\pi(Xx_2 + Yy_2)] dXdY = \\ & = \frac{1}{\lambda f} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} t(x', y') h(x_2 - x', y_2 - y') dx' dy' = \frac{1}{\lambda f} t(x_2, y_2) \otimes h(x_2, y_2). \end{aligned}$$

Соответственно:

$$A_2(x_2, y_2) = \frac{a_0}{\lambda f} \exp[i(4kf + \pi)] t(x_2, y_2) \otimes h(x_2, y_2),$$

где $h(x_2, y_2)$ - импульсный отклик фильтра.

Таким образом, оптический процессор, показанный на рисунке 2, реализует алгоритм двумерного интегрального преобразования свертки двух функций.

При использовании в качестве транспаранта 2 диафрагмы, оптический процессор может осуществлять функцию фильтрации в пространственно-частотной области. Если же в качестве транспаранта 2 применять, к примеру, модулятор, управляемый электрическими сигналами, это позволит реализовать корреляцию между двумя сигналами: вводимым через транспарант, и вводимый через транспарант 2.

В таблице 2 представлен перечень известных интегральных преобразований радиосигналов, которые могут быть реализованы посредством такой оптической системы.

Таблица 2. Интегральные преобразования, реализуемые ОП

Преобразование/вид обработки	Математическая запись	Связь с преобразованием Фурье	Область применения
Фурье	$F[s(t)] = S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j\omega t} dt$	-	Спектральный анализ сигналов
Лапласа	$L[s(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{(b-j\omega)t} dt$	$L[s(t)] = F[s(t)e^{bt}]$	Моделирование радиоэлектронных цепей
Френеля	$Fr[s(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau)e^{-j0,5\beta(t-\tau)^2} d\tau$	$Fr[s(t)] = e^{-j0,5\beta t^2} \cdot F[s(t)e^{j0,5\beta t^2}]$	Масштабные преобразования, задержка сигналов, полосовая фильтрация
Меллина	$M[s(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)t^{-j\omega-1} dt$	$M[s(t)] = F[se^{\tilde{t}}], \tilde{t} = \ln t$	Распознавание образов, доработка доплеровских сигналов
Гильберта	$H[s(t)] = s(t) \cdot (1/\pi t)^{-1}$	$H[s(t)] = F^{-1}\{j \operatorname{sgn}(\omega) \cdot S(\omega)\}$	Однополосная модуляция, уплотнение каналов связи
Спектральная	$S_{np}(t) = s(t) \cdot h(t)$	$S_{np}(t) = F^{-1}[S(\omega) \cdot H(\omega)]$	Свертка, корреляция, фильтрация, дифференцирование сигналов радиолокационных систем и систем связи
Кепстральная	-	$C(\Gamma) = F^{-1}\{\log[S(\omega)]\}$	Обработка изображений, речевых, радиолокационных сигналов

Выводы. Таким образом, показана возможность реализации существующих интегральных преобразований радиосигналов посредством оптических информационных технологий. Следовательно, синтез элементов оптических систем и классических радиотехнических средств, а также оптимальное сочетание оптических информационных технологий и радиотехнических методов обработки информации показывает перспективность их использования:

- в специальных автоматизированных информационно-измерительных системах;
- в автоматизированных системах контроля радиообстановки (радиомониторинг, радиолокация, радиоидентификация, радиоразведка);
- в автоматизированных системах научных исследований радиосигналов;
- в других смежных областях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шалдаев, С. Е. Основные принципы и задачи развития автоматизированных систем управления специального назначения, требования предъявляемые к ним системой управления / С. Е. Шалдаев, К. Е. Легков, О. А. Скоробогатова // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2013. – Т. 7, № 6. – С. 83-87. – EDN RNMQID.
2. Направления реализации средств автоматизированной системы освоения радиоэлектронных комплексов / Д. В. Мартынов, Р. В. Допира, Ф. Н. Абу-Абед [и др.] // Программные продукты и системы. – 2016. – № 4. – С. 149-155. – EDN XVIGHJ.
3. Сайдумаров, И. М. Структура системы наземного автоматизированного контроля бортового радиоэлектронного оборудования / И. М. Сайдумаров, И. Ж. Боймонов // Теория и практика современной науки. – 2017. – № 5(23). – С. 707-711. – EDN ZBMIXZ.
4. Верховая, Г. В. Автоматизированное рабочее место специалиста пункта управления сетью связи специального назначения / Г. В. Верховая, К. В. Белоус // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2017. – Т. 9, № 2. – С. 18-23. – EDN YMZQYX.
5. Кузнецов, С. В. Модель единой централизованной автоматизированной системы управления техническим состоянием вооружения, военной и специальной техники / С. В. Кузнецов, А. М. Винограденко // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2018. – Т. 10, № 4. – С. 48-54. – DOI 10.24411/2409-5419-2018-10096. – EDN YATSQX.
6. Пометун, Е. Д. Разработка автоматизированной системы измерения параметров турбулентности / Е. Д. Пометун, В. Н. Лебедев // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2025. – № 1. – С. 20-25. – DOI 10.5281/zenodo.15056665. – EDN BEWEYW.
7. Оптические измерительно-информационные системы и технологии для научных и промышленных применений / А. Г. Верхогляд, И. А. Выхристюк, П. С. Завьялов [и др.] // Мир измерений. – 2012. – № 10. – С. 11-19. – EDN PCUIQD.
8. Третьяков, И. А. Применение оптических методов обработки информации в АСНИ радиосигналов / И. А. Третьяков, В. В. Данилов, В. А. Ступак // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 1. – С. 42-49. – DOI 10.5281/zenodo.10974622. – EDN LSKSPA.
9. Черемисин, Д. Г. Оптические технологии и их применение в современной электронике / Д. Г. Черемисин, В. Р. Мкртчян, А. Д. Музлова // Символ науки: международный научный журнал. – 2024. – № 1-2. – С. 55-56. – EDN IWWYZA.
10. Нечаев, Е. Е. Современные бортовые радиолокационные станции и антенные решетки многофункциональных авиационных комплексов военного назначения / Е. Е. Нечаев, К. С. Дерябин // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2015. – № 221(11). – С. 90-105. – EDN VJLPCL.
11. Николаев, И. А. Проблемы и возможности инновационного развития в радиоэлектронной отрасли России (оценка современного состояния радиоэлектронной отрасли) / И. А. Николаев // Инновации. – 2015. – № 5(199). – С. 53-60. – EDN UHOXUF.
12. Михайлов, Р. Л. Радиоэлектронная борьба в Вооруженных силах США: военно-теоретический труд / Р. Л. Михайлов; Научные технологии. – Санкт-Петербург: Издательство «Научные технологии», 2018. – 131 с. – EDN YTHGZM.
13. Симонов, А. Д. Состояние и основные направления развития автоматизированных систем управления радиоэлектронной борьбой / А. Д. Симонов // Военная мысль. – 2022. – № 8. – С. 51-56. – EDN KYBTSE.
14. Тупиков, В. А. Состояние и перспективы развития научных исследований и разработок в области оптических систем обработки информации в интересах развития высокоточных систем наведения, информационного обеспечения и продукции двойного назначения / В. А. Тупиков // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 3(104). – С. 48-55. – EDN LMCOMX.
15. Соколов, С. А. Оптимальная обработка сложных сигналов при помощи эффекта спинового эха / С. А. Соколов // Сб. трудов Рязанского радиотехнического института. – №5. – 2001. С. 74 – 81.
16. Федотов, Я. А. Функциональная электроника / Я. А. Федотов. – Москва: Высш. шк., 2012. – 455 с.

17. Третьяков, И. А. Теоретические основы реализации устройств телекоммуникаций на принципах функциональной электроники / И. А. Третьяков, В. В. Данилов // Вестник Академии гражданской защиты. – 2021. – № 2(26). – С. 51-58. – EDN PIRAQD.
18. Третьяков, И. А. Обработка радиочастотных сигналов устройствами на основе эхо-эффекта / И. А. Третьяков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2021. – № 3. – С. 28-33. – EDN JYWGQO.
19. Гудмен, Д. Введение в Фурье-оптику/ Пер. с англ. Под ред. Г.И. Косоурова. – М.: Мир. – 1970. – 366 с.
20. Сороко, Л. М. Основы голографии и когерентной оптики / Л. М. Сороко. – М: Наука, 1971. – 616 с.
21. Данилов, В. В. Оптические информационные технологии. Дифракция электромагнитных волн / В. В. Данилов, В. И. Тимченко, И. А. Третьяков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2019. – № 2. – С. 36-44. – EDN VUODQQ.
22. Оптические информационные технологии. Особенности прохождения плоской электромагнитной волны через передающие среды / В. В. Данилов, В. И. Тимченко, И. А. Третьяков, В. А. Гмыря // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2019. – № 4. – С. 36-43. – EDN YCMFOU.
23. Очин, Е. Ф. Вычислительные системы обработки изображений / Е. Ф. Очин. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 136 с.
24. Papoulis, A. Systems and transforms with applications in optics / A. Papoulis. – New York: McGraw-Hill, 1968. – 474 p.

Поступила в редакцию 30.06.2025 г., рекомендована к печати 23.07.2025 г.

ELEMENTS OF COMPUTING FACILITIES FOR THE IMPLEMENTATION OF THE ALGORITHM OF INTEGRAL TRANSFORMATIONS IN ASRS OF RADIO SIGNALS

Tretiakov I.A., Danilov V.V.

This paper examines the elements of computing tools and their structural schemes necessary for the implementation of algorithms for integrated transformations in automated systems of scientific research and processing of radio signals. The possibility of implementing existing integrated radio signal transformations using optical information technologies is shown.

Keywords: IMS, ASRS, radio signal processing, Fourier transform, optical information technologies, optical processor.

Третьяков Игорь Александрович

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: i.tretiakov@mail.ru

Tretiakov Igor Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Данилов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: ut5iv@mail.ru

Danilov Vladimir Vasilevich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ К-СРЕДНИХ И DBSCAN ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ С ПРИМЕРАМИ НА PYTHON

© 2025 Пономарёв Д.С.

В работе рассмотрено применение методов кластерного анализа для оптимизации производственных процессов. Приведено решение задачи повышения эффективности процессов механической обработки на примере работы универсальных фрезерных станков. На основе производственных данных, включающих скорость резания, подачу, глубину, вибрацию, температуру, шероховатость поверхности и стойкость инструмента, проведена кластеризация производственных циклов методами k-средних и DBSCAN. В результате анализа выявлены три характерных режима работы оборудования. Применение метода k-средних позволило выделить оптимальный, умеренный и экстремальный (брак) режимы. Применение метода DBSCAN позволило обнаружить аномальные циклы, связанные с перегревом и критической вибрацией. Практическая значимость работы заключается в определении рекомендуемых параметров резания способных снизить брак и разработке критериев для системы мониторинга с целью предупреждения критических режимов работы станка.

Ключевые слова: кластерный анализ, Python, оптимизация, производственные процессы, k-means, DBSCAN.

Введение. В условиях Четвертой промышленной революции (Индустрии 4.0) производственные предприятия сталкиваются с фундаментальным вызовом: необходимостью перехода от традиционных, зачастую интуитивных методов управления к парадигме, основанной на данных. Современное оборудование, оснащенное множеством датчиков, генерирует непрерывные потоки информации – о вибрациях, температуре, энергопотреблении, скорости и десятках других параметров. Этот колоссальный объем данных является, с одной стороны, бесценным ресурсом для оптимизации, а с другой – сложнейшей аналитической задачей, решение которой недоступно для стандартных подходов. Ручной анализ и экспертные оценки, долгое время бывшие основой инженерной практики, оказываются неспособны охватить всю полноту многомерных и нелинейных взаимосвязей, скрытых в промышленных данных.

Особенно остро эта проблема стоит в области высокоточной механической обработки. Эффективность таких процессов – это хрупкий баланс между производительностью, качеством конечного изделия и долговечностью дорогостоящего оборудования и инструмента. Неверно подобранный режим резания, даже незначительно отклоняющийся от оптимального, может привести к каскаду негативных последствий: от увеличения шероховатости поверхности и геометрических отклонений (брак) до ускоренного износа режущего инструмента и, в худшем случае, аварийной остановки станка. Традиционно настройка режимов опирается на справочные данные и опыт технолога, однако этот подход не учитывает уникальные особенности конкретного станка, износ его узлов, свойства материала и другие динамические факторы, которые и определяют реальный результат.

Именно здесь на передний план выходят методы машинного обучения, и в частности – кластерный анализ [1, 2]. Являясь мощным инструментом обучения без учителя, кластеризация позволяет не проверять заранее сформулированные гипотезы, а обнаруживать внутреннюю, естественную структуру в «сырых» данных.

Алгоритмы кластерного анализа способны, подобно цифровому исследователю, самостоятельно проанализировать тысячи производственных циклов и сгруппировать их в однородные категории, или кластеры. Каждый такой кластер представляет собой определенный режим работы оборудования со своим уникальным набором характеристик и последствий.

Это позволяет выявить не только очевидные, но и скрытые закономерности: например, обнаружить комбинацию параметров, которая ведет к оптимальному результату, или, наоборот, идентифицировать опасные режимы, предшествующие возникновению брака.

Основной целью работы явилось систематизировать и оценить эффективность методов кластерного анализа для оптимизации производственных процессов на фрезерных станках (на примере универсальных фрезерных станков 6P82Ш).

В связи с данной целью, были поставлены следующие задачи:

- выделить группы (кластеры) схожих режимов обработки на основе собранных данных;
- определить оптимальный режим работы, характеризующийся высоким качеством поверхности (низкая шероховатость) и высокой стойкостью инструмента;
- выявить аномальные производственные циклы, приводящие к браку, повышенному износу инструмента и возможным поломкам оборудования.
- разработать практические рекомендации для производства по настройке оборудования и мониторингу его состояния.

Материалы и методы. Сбор данных проводился на примере универсального фрезерного станка (6P82Ш) с ручным управлением, оснащенный следующими датчиками: механический виброметр (ИВВ-102) для измерения вибрации; контактный термометр (ТХК-038) для контроля температуры в зоне резания; микрометр для измерения шероховатости; секундомер для фиксации стойкости инструмента. Параметры записывались в журнал наблюдений с фиксацией: времени операции; параметров режима (скорость, подача, глубина); показаний датчиков. Рассмотрены параметры: скорость резания (м/мин) – регулируется изменением частоты вращения шпинделя; подача (мм/об) – задается вручную через коробку подач; глубина резания (мм) – устанавливается механическим лимбом; вибрация (м/с²) – фиксируется виброметром каждые 5 минут; температура (°С) – измеряется термометром после каждого прохода; шероховатость (мкм) – замеряется профилометром для каждой детали; стойкость инструмента (мин) – время до замены резца по критерию затупления.

Методология расчетов основывалась на методах кластерного анализа. Метод *k*-средних (*k*-means) использовался для основной, первичной группировки всех производственных циклов [3]. Метод *k*-средних был направлен на минимизацию суммарного внутрикластерного разброса. Целевая функция (сумма квадратов расстояний) для *k* кластеров определяется как [4, 5]:

$$J = \sum_{j=1}^k \sum_{i \in C_j} \|x_i - \mu_j\|^2,$$

где x_i – вектор признаков *i*-го наблюдения; μ_j – центроид *j*-го кластера, вычисляемый как среднее всех точек, принадлежащих кластеру C_j :

$$\mu_j = \frac{1}{|C_j|} \sum_{i \in C_j} x_i.$$

Алгоритм итеративно обновляет центроиды и перераспределяет точки до тех пор, пока J не стабилизируется или не будет достигнуто заданное количество итераций.

DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise [6]) применялся целенаправленно для поиска аномалий – редких, нетипичных циклов, которые не вписываются в общие режимы работы. Метод находит такие точки как «шум» или «выбросы». Ключевые параметры алгоритма включают радиус окрестности e и минимальное количество точек m (min_samples) в этой окрестности. Точка x_i считается [7]:

– ядерной, если в ее окрестности находится не менее m точек:

$$Ne(x_i) = \{x_j \mid \|x_i - x_j\| \leq e\}, |Ne(x_i)| \geq m;$$

– граничной, если она находится в окрестности ядерной точки, но сама не является ядерной;

– шумовой (аномалией), если она не является ни ядерной, ни граничной.

Кластер формируется путем объединения всех ядерных точек, достижимых друг из друга через цепочки e -окрестностей [8]. В исследовании использовались параметры $e = 1,5$ и $m = 5$, что позволило выделить 12 аномальных циклов.

Для анализа использовались данные, собранные с датчиков станка и систем контроля качества. Объем выборки: 600 наблюдений (производственных циклов) за 30 рабочих дней. Рассмотренные параметры и признаки представлены в таблице 1.

Таблица 1. Рассмотренные параметры и признаки

№	Параметр	Единица измерения	Описание
1	Скорость реза	м/мин	Регулируемый параметр скорости вращения шпинделя или движения заготовки.
2	Подача	мм/об	Скорость движения режущего инструмента относительно заготовки.
3	Глубина реза	мм	Толщина снимаемого слоя материала за один проход.
4	Вибрация	м/с ²	Уровень вибрации, измеренный акселерометром.
5	Температура	°С	Температура в зоне резания, измеренная термопарой.
6	Шероховатость	мкм	Показатель качества обработанной поверхности.
7	Стойкость инструмента	мин	Время работы инструмента до его замены (из-за износа).

Методология и ход анализа. Анализ проводился в несколько этапов с использованием языка Python и библиотек pandas, scikit-learn, matplotlib, seaborn [9-11]. Был проведен корреляционный анализ данных. Разработана матрица корреляций. Ее визуализацию можно реализовать как:

```
plt.figure(figsize=(8, 6))
sns.heatmap(corr_matrix, annot=True, cmap='coolwarm', vmin=-1, vmax=1, center=0)
plt.title('Корреляционная матрица параметров станка')
plt.tight_layout()
plt.savefig('correlation_matrix.png')
plt.show()
```

Это было нужно для выявления статистических взаимосвязей между параметрами. После некоторых доработок были получены результаты применения корреляционного анализа (рисунок 1).



Рис. 1. Результаты применения корреляционного анализа

Все признаки были нормализованы с помощью `StandardScaler` для приведения их к единому масштабу, что необходимо для корректной работы алгоритмов кластеризации:

```
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
scaler = StandardScaler()
scaled_data = scaler.fit_transform(data)
```

`StandardScaler` стандартизирует признаки путем удаления среднего и масштабирования до единичной дисперсии. Основная формула, которая используется для каждого значения в наборе данных – это формула Z -оценки (Z -score). Для каждого значения x в признаке (например, для каждого значения вибрации) вычисляется его стандартизированное значение z по формуле:

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma},$$

где z – новое, стандартизированное значение; x – исходное значение признака; μ – среднее арифметическое всех значений данного признака; σ – стандартное отклонение всех значений данного признака.

После чего была проведена кластеризация методом k -means для выявления режимов работы. Далее был применен метод локтя (Elbow Method [12]) Он был использован для определения оптимального количества кластеров (k) в алгоритме k -means, примененном для группировки производственных циклов на станках. Этот метод основан на анализе зависимости целевой функции k -means – суммарного внутрикластерного разброса (Within-Cluster Sum of Squares, WCSS) – от числа кластеров. Задачей данного подхода является выбор такого значения k , при котором дальнейшее увеличение числа кластеров приводит к незначительному уменьшению WCSS, что указывает на естественное разделение данных. Процедура применения метода локтя была выполнена при помощи следующих шагов:

– подготовка данных: данные, включающие параметры обработки (скорость резания, подача, глубина резания, вибрация, температура, шероховатость поверхности, стойкость инструмента), были предварительно нормализованы с использованием `StandardScaler`, как описано ранее, это обеспечивало равный вклад всех признаков в вычисление расстояний;

Были получены следующие ключевые выводы:

- вибрация сильно положительно коррелирует со скоростью резания (0,85) и подачей (0,78);

- температура сильно зависит от глубины резания (0,72);

- стойкость инструмента сильно отрицательно коррелирует с вибрацией (-0,74) и температурой (-0,66), что логично: выше нагрузка – быстрее износ;

- шероховатость (показатель брака) положительно коррелирует с вибрацией (0,68) и температурой (0,61).

Далее было проведено масштабирование данных.

– итеративное применение k -means: алгоритм был запущен многократно с варьированием числа кластеров от $k=1$ до $k=6$. Для каждого значения k вычислялось значение WCSS. Чтобы минимизировать влияние случайной инициализации центроидов, для каждого k выполнялось 10 запусков алгоритма с различными начальными положениями центроидов (параметр $n_init=10$ в scikit-learn), и выбирался результат с минимальным WCSS.

Визуализация «графика локтя»: значения WCSS были построены в виде графика зависимости от k . На графике искалась точка, где снижение WCSS становится менее выраженным, что указывает на оптимальное число кластеров.

Результат применения представлен на рисунке 2. Анализ графика показал, что при $k=3$ наблюдается заметный изгиб: дальнейшее увеличение числа кластеров (до 4, 5 или 6) приводило к незначительному снижению WCSS. Это подтвердило, что $k=3$ является оптимальным числом кластеров, соответствующим трем режимам работы станка: оптимальному, умеренному и экстремальному.

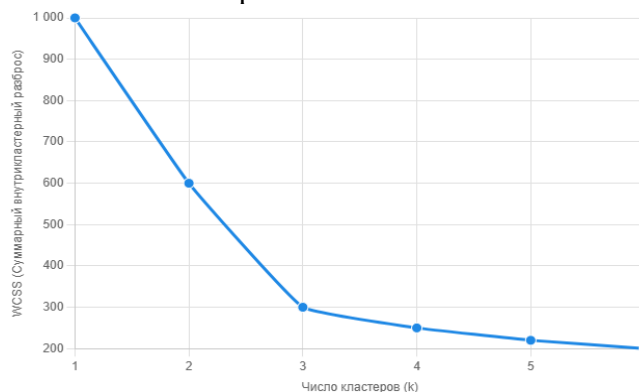


Рис. 2. Результаты применения метода Elbow Method

В результате распределение значений исследуемых параметров по трем кластерам было получено следующее (таблица 2).

Таблица 2. Результаты распределения значений параметров по трем кластерам

Кластер	Характеристика режима	Скорость	Подача	Глубина	Вибрация	Температура	Шероховатость	Стойкость инструмента
1	Оптимальный	110,00	0,12	0,7	1,80	78,00	1,10	105,00
2	Экстремальный	180,00	0,25	1,30	4,20	120,00	3,50	40,00
3	Умеренный	150,00	0,18	1,0	2,90	95,00	2,00	70,00

В таблице представлены данные, отражающие средние значения параметров обработки для трех кластеров, выделенных с использованием метода k -means в процессе оптимизации работы станков. Кластеры, обозначенные как оптимальный, экстремальный и умеренный, демонстрируют различные режимы функционирования оборудования, что позволяет оценить влияние технологических параметров на качество обработки и долговечность инструмента. Результаты кластерного анализа можно также представить и в графическом виде (матрица взаимных распределений) на рисунке 3. Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом:

Кластер 1: низкая скорость, вибрация и температура. Обеспечивает наилучшее качество поверхности (минимальная шероховатость) и максимальный срок службы инструмента. Это целевой, оптимальный режим.

Кластер 2: высокие значения скорости, подачи, вибрации и температуры. Приводит к высокому уровню брака (высокая шероховатость) и быстрому износу инструмента. Этого режима следует избегать.

Кластер 3: промежуточные параметры. Качество и износ хуже, чем в оптимальном режиме, но лучше, чем в экстремальном.

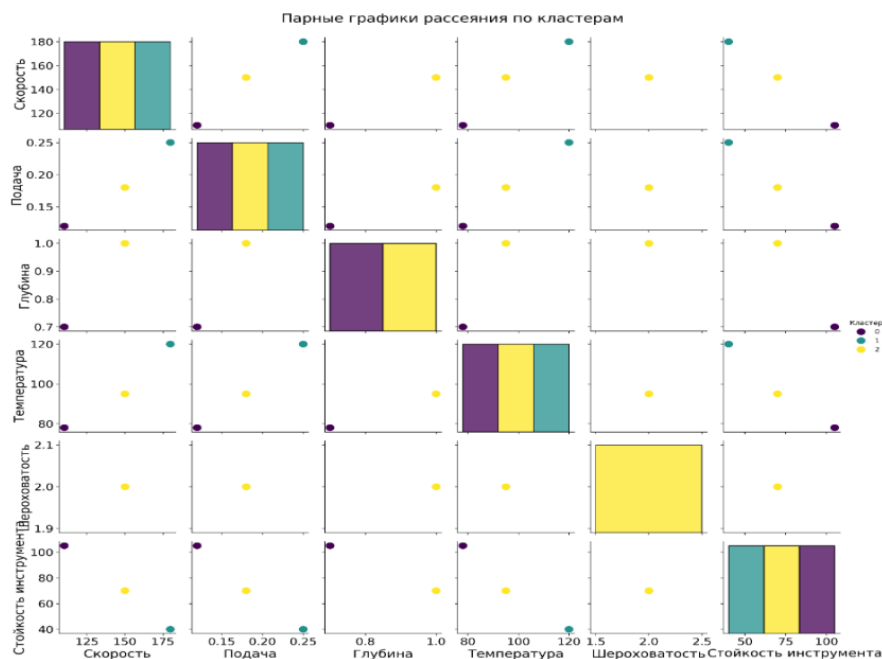


Рис. 3. Распределение данных по кластерам

После этого было проведено обнаружение аномалий методом DBSCAN. Поставленной задачей данного шага являлось выявить отдельные, нетипичные производственные циклы, которые могут сигнализировать о предкритическом состоянии оборудования, но не образуют достаточно большого кластера для k -means. Алгоритм был запущен с параметрами $eps=1,5$, $min_samples=5$. Точки, не попавшие ни в один кластер, были помечены как аномалии (-1). В результате применения данного подхода было выделено 12 аномальных циклов (2% от выборки). Анализ этих циклов показал, что они характеризуются экстремальными значениями температуры ($> 110^{\circ}\text{C}$) и/или вибрации ($> 4 \text{ м/с}^2$).

Закключение. Представленная работа посвящена практическому применению методов кластерного анализа для решения задачи оптимизации производственных процессов на фрезерных универсальных станках. На примере набора данных, включающего ключевые параметры обработки, было продемонстрировано, как с помощью алгоритмов k -means и DBSCAN можно не только выделить характерные режимы работы, но и обнаружить критические аномалии, сигнализирующие о потенциальных сбоях.

Применение кластерного анализа позволило выявить 3 основных режима работы станка и разработать следующие рекомендации для производства:

- использовать оптимальный режим (на основе Кластера 1): скорость: 100–120 м/мин; подача: 0,10–0,15 мм/об; глубина резания: 0,5–0,8 мм. Ожидаемый результат здесь минимальный уровень брака и максимальная стойкость инструмента;

- избегать экстремального режима (на основе Кластера 2): следует избегать комбинаций скорости > 170 м/мин и подачи $> 0,2$ мм/об. Такой режим ведет к резкому росту брака и ускоренному износу инструмента.

- внедрить мониторинг аномалий (на основе DBSCAN): создать систему оповещений, которая срабатывает при превышении пороговых значений (температура в зоне резания $> 110^{\circ}\text{C}$, вибрация $> 4 \text{ м/с}^2$), что позволит предупредить оператора о потенциально опасном режиме для своевременной коррекции или остановки процесса, что предотвратит брак и поломку.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Hastie, T. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction / T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman. – Springer, 2017. – 745 p.
2. Bishop, C. M. Pattern Recognition and Machine Learning / C. M. Bishop. – Springer, 2006. – 738 p.
3. Unsupervised machine learning for local stress identification in fatigue analysis of welded joints / M. Ghanadi, M. Kumar, P. O. Danielsson [et al.] // Welding in the World. – 2025. – Vol. 69, No. 1. – P. 213-226. – DOI 10.1007/s40194-024-01868-5. – EDN YXAKXY.
4. Cluster Analysis / B. S. Everitt, S. Landau, M. Leese, D. Stahl. – 5th ed. – Wiley, 2011. – P. 71–110.
5. Wu, Junjie. Advances in K-means Clustering: A Data Mining Thinking / Junjie Wu. – Springer, 2012. – P. 24-75.
6. DBSCAN revisited, revisited: Why and how you should (still) use DBSCAN / E. Schubert, J. Sander, M. Ester [et al.] // ACM Transactions on Database Systems. – 2017. – Vol. 42, No. 3. – P. 19. – DOI 10.1145/3068335. – EDN YHUF RD.
7. Detection of natural clusters via S-DBSCAN a Self-tuning version of DBSCAN / F. Ros, S. Guillaume, R. Riad, M. El Hajji // Knowledge-Based Systems. – 2022. – Vol. 241. – P. 108288. – DOI 10.1016/j.knosys.2022.108288. – EDN STOYBU.
8. Paramita, A. S. Comparison of K-Means and DBSCAN Algorithms for Customer Segmentation in E-commerce / A. S. Paramita, T. Hariguna // Journal of Digital Market and Digital Currency. – 2024. – Vol. 1, No. 1. – P. 43-62. – DOI 10.47738/jdm dc.v1i1.3. – EDN ZQDDXI.
9. McKinney, W. Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and IPython / W. McKinney. – O'Reilly Media, 2017. – 550 p.
10. Scikit-learn: Machine Learning in Python [Электронный ресурс] / Scikit-learn developers. – URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/clustering.html> (дата обращения 20.06.2025).
11. Madhavan, S. Mastering Python for Data Science / S. Madhavan. – Packet Publishing, 2018. – 276 p.
12. Best Cluster Optimization with Combination of K-Means Algorithm And Elbow Method Towards Rice Production Status Determination / P. M. Hasugian, B. Sinaga, J. Manurung, S. A. Al Hashim // International Journal of Artificial Intelligence Research. – 2021. – Vol. 5, No. 1. – DOI 10.29099/ijair.v6i1.232.

Поступила в редакцию 03.07.2025 г., рекомендована к печати 01.08.2025 г.

APPLICATION OF K-MEANS AND DBSCAN METHODS FOR OPTIMIZING PRODUCTION PROCESSES WITH PYTHON EXAMPLES

Ponomarev D.S.

The paper considers the application of cluster analysis methods to optimize production processes. The solution of the problem of increasing the efficiency of machining processes is given using the example of universal milling machines. Based on production data, including cutting speed, feed, depth, vibration, temperature, surface roughness and tool durability, clusterization of production cycles using k-means and DBSCAN methods was carried out. As a result of the analysis, three characteristic operating modes of the equipment were identified. The application of the k-means method made it possible to identify optimal, moderate and extreme (marriage) modes. The application of the DBSCAN method made it possible to detect abnormal cycles associated with overheating and critical vibration. The practical significance of the work lies in determining the recommended cutting parameters capable of reducing defects and developing criteria for a monitoring system in order to prevent critical operating modes of the machine.

Keywords: cluster analysis, Python, optimization, production processes, k-means, DBSCAN.

Пономарёв Дмитрий Сергеевич

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник филиала (г. Ижевск) ФКУ «Научно-исследовательский институт Федеральной службы исполнения наказаний», доцент кафедры водоснабжения и водоподготовки ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», Российская Федерация, Удмуртская Республика, г. Ижевск.
E-mail: ponomarev.dmitry1990@mail.ru

Ponomarev Dmitrii Sergeevich

Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher of the Branch (Izhevsk) of the Federal Penitentiary Service of Russia, Associate Professor of Izhevsk State Technical University, Russian Federation, Udmurt Republic, Izhevsk.

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ РЕГИСТРАТУР И ЗОН ОЖИДАНИЯ В МЕДИЦИНСКИХ ОРГАНИЗАЦИЯХ НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

© 2025 *Николенко Т.А., Ермаков Н.В., Данилов О.Ф.*

В статье рассмотрена интеллектуальная комплексная система, предназначенная для автоматического мониторинга очередей посетителей медицинских учреждений. Система обрабатывает сигналы с установленных камер видеонаблюдения, выявляет долговременное отсутствие регистратора на рабочем месте, формирует тепловые карты загрузки очередей пациентов и способна, на основании собранной информации предоставить руководству медицинского учреждения обоснованные рекомендации при принятии кадровых управленческих решений.

Ключевые слова: компьютерное зрение, интернет-вещей, машинное обучение, медицинская аналитическая система.

Введение. Эффективное функционирование регистратур и зон ожидания в медицинских учреждениях представляет собой критически важный фактор, влияющий на уровень удовлетворённости пациентов, соблюдение нормативов доступности первичной медико-санитарной помощи (ПМСП) и рациональное использование кадровых ресурсов. Однако административный персонал поликлиник систематически сталкивается с рядом организационных проблем: формированием очередей при отсутствии регистраторов, превышением регламентированного времени ожидания, нерегулярными пиковыми нагрузками, а также недостатком объективных данных для оперативного управления персоналом.

Традиционные методы мониторинга, включая ручные обходы, выборочные хронометражные замеры и ведение журналов учёта обращений, не обеспечивают достаточной точности и оперативности получаемой информации. Это приводит к снижению управляемости процессами, повышению риска социальной напряжённости и экономическим потерям учреждения.

Методология и научная новизна. В настоящем исследовании предложена инновационная методика автоматизированного контроля на основе алгоритмов компьютерного зрения, позволяющая в режиме реального времени:

- оценивать количество посетителей в зонах ожидания,
- фиксировать факты отсутствия сотрудников на рабочих местах,
- классифицировать временные интервалы по уровню нагрузки.

Научная новизна работы заключается в разработке многоуровневой системы мониторинга, интегрирующей распределённую сеть видеонаблюдения, методы машинного обучения (включая модели глубокого обучения) и модули визуальной аналитики, адаптированные к специфике медицинских организаций.

Цель исследования. Основной целью исследования является проектирование и реализация системы мониторинга инцидентов в медицинских учреждениях на базе технологий видеонаблюдения и интеллектуальной аналитики.

Практическая значимость. Внедрение предложенного решения позволит:

- сократить время ожидания пациентов и повысить уровень их удовлетворённости,

- минимизировать незапланированные простои персонала за счёт автоматизированных уведомлений о критических ситуациях,
- оптимизировать распределение трудовых ресурсов на основе объективных данных.

Объект исследования. Объектом исследования выступает распределённая система видеонаблюдения и вычислительная инфраструктура, предназначенная для автоматизированного контроля инцидентов в медицинских организациях.

Архитектура системы. Система включает три взаимосвязанных уровня:

1. Периферийный уровень

- Сетевые видеокамеры с поддержкой кодеков H.264/H.265 и протоколов RTSP/ONVIF, обеспечивающие передачу потокового видео.
- Оптимальное расположение камер для охвата ключевых зон: стоек регистрации, коридоров и автоматизированных терминалов.

2. Транспортная сеть

- Гигабитная локальная сеть с VLAN-сегментацией для разделения трафика.
- Управляемые коммутаторы с поддержкой PoE и QoS.
- Защищённый VPN-канал для передачи данных в облачную среду.

3. Облачный вычислительный контур (SaaS)

- Микросервисная архитектура на базе Docker.
- Гибкое хранилище данных (реляционные и NoSQL СУБД).
- Конвейер обработки видео с использованием моделей глубокого обучения для детекции людей, оценки очередей и контроля присутствия персонала.
- Аналитический модуль для генерации отчётов и рекомендаций.

Первый уровень – периферийный. Он включает сетевые видеокамеры, установленные в зонах ожидания и на рабочих местах регистраторов. Камеры, оснащенные модулями аппаратного кодирования H.264/H.265 и поддерживают протоколы RTSP/ONVIF для передачи потокового видео. Камеры установлены в медицинских организациях таким образом, чтобы обеспечить обзор мест максимального скопления посетителей: регистратур, коридоров, терминалов автоматизированной записи.

Второй уровень – транспортная сеть. Для надёжной доставки данных используется гигабитная локальная сеть с маршрутизируемым VLAN-сегментом, разделённым на камеры и общеклинические сервисы. Применяются управляемые коммутаторы с поддержкой PoE, обеспечивающие питание камер и приоритизацию трафика (QoS). Внешний канал связи организован через защищённый VPN-туннель, что позволяет направлять видеопотоки в облако без угрозы утечки данных [1-5].

Третий уровень – облачный вычислительный контур по модели «программное обеспечение как услуга». Его основу составляют микросервисы, развёрнутые в изолированных контейнерах с помощью платформы контейнеризации Docker, хранилище событий на базе реляционной и нереляционной СУБД, подсистема кэширования, а также оркестратор, автоматически распределяющий нагрузку. Видеоданные передаются в модуль декодирования, после чего подвергаются поэтапной обработке в рамках конвейера компьютерного зрения [6, 7]. На данном этапе нейросетевые модели, основанные на методах глубокого обучения, осуществляют:

- обнаружение людей в кадре,
- анализ протяжённости очереди,
- выявление случаев отсутствия регистрационного персонала на рабочих местах.

Взаимосвязь и схематическое расположение указанных уровней представлено на рис. 1.

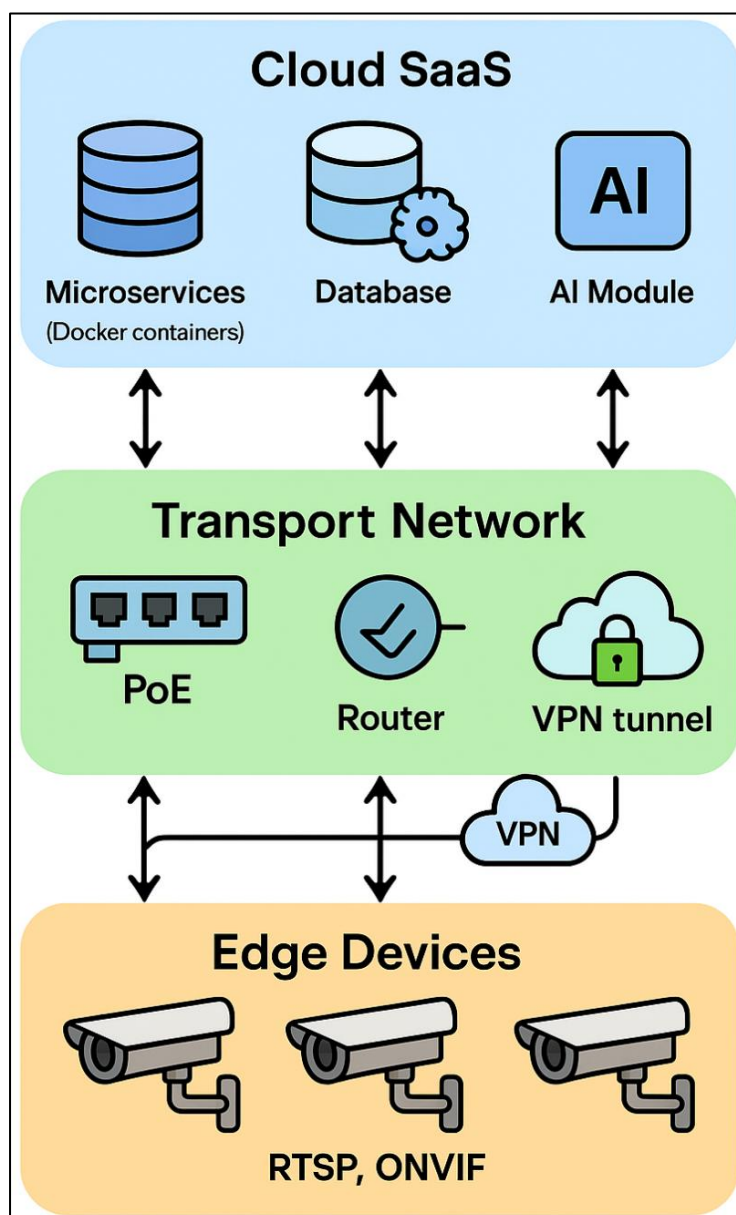


Рис. 1. Физический концепт разрабатываемой системы мониторинга инцидентов

Полученные метаданные записываются в базу данных, после чего используются аналитическими подсистемами и отображаются в интерфейсе для принятия управленческих решений.

Таким образом, физическая система сочетает периферийное оборудование (камеры и сетевую инфраструктуру) и облачные ресурсы, формируя целостную платформу, способную обрабатывать высокочастотные видеопотоки в реальном времени и поддерживать сервис на уровне промышленной надёжности [8-10].

Разрабатываемая система осуществляет полный цикл обработки видеоданных от момента их получения до формирования аналитических отчетов для руководства. Вся функциональность платформы организована в виде четырех основных модулей, работающих согласованно.

На первом этапе происходит сбор и первичная обработка видеоданных. Система принимает потоковое видео с сетевых камер, используя стандартные протоколы RTSP и HTTP [11, 12]. Для обеспечения целостности данных выполняется автоматическая буферизация и временная синхронизация потоков с применением NTP-меток [13-15]. Видеосигналы проходят предварительную фильтрацию и нормализацию перед дальнейшим анализом.

Следующим этапом является онлайн-аналитика видеопотоков. Здесь задействуются сложные алгоритмы компьютерного зрения, позволяющие обнаруживать людей в кадре и выделять функциональные зоны, такие как регистрационные пункты и зоны ожидания [16-20]. Система в реальном времени рассчитывает важные показатели: динамику длины очереди, временные параметры обслуживания и продолжительность ожидания пациентов. При превышении установленных нормативов автоматически генерируются соответствующие уведомления.

Особое внимание уделяется хранению данных и интеллектуальной аналитике. Все метаданные надежно сохраняются в СУБД с использованием механизмов фиксации в электронные журналы [21, 22]. Классификационные модели регулярно обновляются на основе накопленных исторических данных, что позволяет выявлять временные паттерны нагрузки, включая пиковые и спадовые периоды. Дополнительно система строит пространственно-временные тепловые карты активности.

Важной составляющей является модуль визуализации и системы оповещений. Он генерирует интерактивные аналитические панели и обеспечивает многоуровневую систему уведомлений через электронную почту, мессенджеры и push-сообщения. Для интеграции с корпоративными информационными системами предусмотрен RESTful API.

Архитектура платформы. Проектируемое решение построено по модели SaaS (Software-as-a-Service) и включает пять взаимосвязанных компонентов (рис. 2), что обеспечивает гибкость масштабирования, соблюдение требований информационной безопасности и четкое разделение функциональных обязанностей [23-25].

Периферийный модуль состоит из интеллектуальных IP-камер, способных выполнять локальную предобработку данных. Эти устройства формируют структурированные метаданные и передают их в систему. Администрирование осуществляется по двухуровневой схеме: технический персонал на местах занимается локальным обслуживанием, тогда как централизованное управление конфигурациями выполняется администраторами [1, 3, 26].

Транспортная инфраструктура организована с использованием выделенного VLAN с QoS-приоритизацией. Для защиты данных применяется криптографическое шифрование трафика по протоколу TLS 1.3, а безопасная передача информации обеспечивается через VPN-шлюзы.

Вычислительное ядро (Backend) представляет собой гетерогенную облачную инфраструктуру. В ее состав входят микросервисные компоненты для аутентификации и маршрутизации, контейнеризированные аналитические модули и гибкая система хранения данных на базе MS SQL. Масштабирование ресурсов происходит автоматически с использованием платформы Kubernetes.

Подсистема визуализации реализована в виде SPA-приложения с интерактивными дашбордами. Она предлагает стандартизированные интерфейсы представления данных и гарантирует доступность на уровне 99.9% согласно SLA.

Интеграционный компонент предоставляет унифицированные API (REST, GraphQL) для взаимодействия с внешними системами. Он поддерживает подключение к медицинским информационным системам, BI-платформам и системам учета рабочего времени, обеспечивая комплексный подход к мониторингу и анализу работы медицинских учреждений [2, 27].

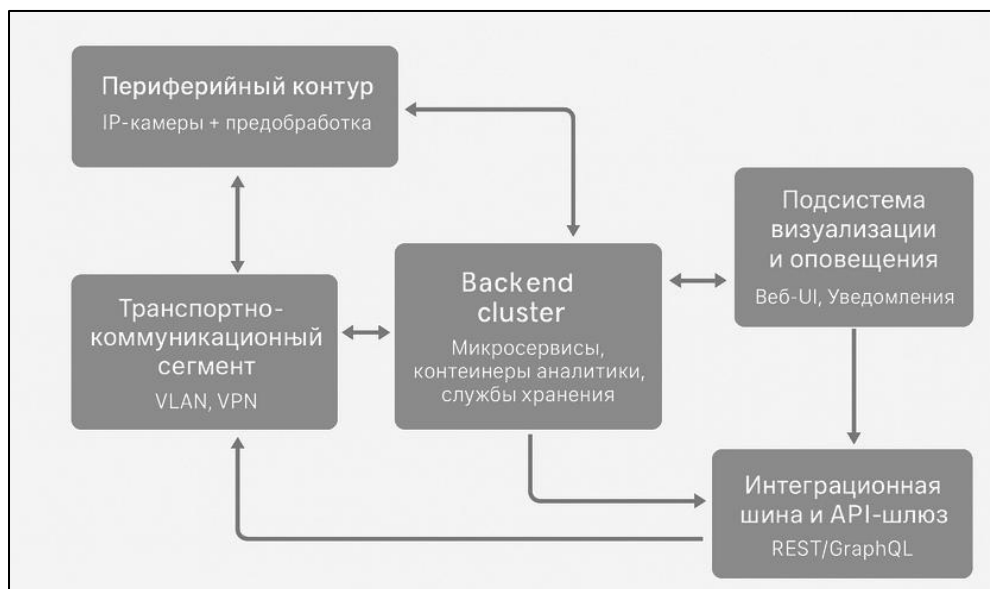


Рис. 2. Организационная структура разрабатываемой системы мониторинга инцидентов

Описание объекта исследования как информационной системы.

Проектируемая система мониторинга инцидентов представляет собой распределённую информационную систему ситуационного управления, интегрируемую в инфраструктуру медицинских организаций. В концептуальном плане система структурирована на четыре логических уровня, образующих единый конвейер обработки данных.

На уровне первичного сбора данных функционируют сетевые видеокamеры, оснащённые модулями встроенной аналитики. Особенностью архитектуры является передача не исходного видеопотока, а структурированных метаданных, содержащих координаты объектов, временные метки и идентификаторы локаций. Такой подход позволяет существенно снизить нагрузку на сетевую инфраструктуру и обеспечивает соответствие требованиям по защите персональных данных [28, 29].

Транспортно-коммуникационный уровень реализован в виде выделенного виртуального сегмента локальной вычислительной сети медицинского учреждения. Для обеспечения информационной безопасности применяется сквозное шифрование трафика на уровне протоколов передачи. Система маршрутизации настроена с учётом приоритезации сообщений об инцидентах перед фоновым сетевым трафиком [30].

Уровень обработки и хранения данных построен на основе контейнеризированных микросервисов, развёрнутых в защищённом облачном окружении. Архитектурной особенностью данного уровня является реализация принципа "шины данных", обеспечивающего независимое масштабирование компонентов. Ключевыми элементами выступают: модуль предобработки и валидации входящих данных, сервисы компьютерного зрения с реализацией алгоритмов классификации событий, специализированное хранилище временных рядов для метрик нагрузки, а также реляционная база данных для хранения описательных атрибутов [31].

Уровень представления информации и поддержки принятия решений обеспечивает персонализированный доступ к функциональности системы для различных категорий пользователей. Руководящий состав получает доступ к сводным дашбордам, оперативный персонал работает с потоком уведомлений в реальном времени, а аналитические службы используют исторические данные инцидентов для стратегического планирования ресурсов. Все интерфейсные решения интегрированы в единую корпоративную информационную среду медицинского учреждения [32].

Описание функций подсистем. Для обеспечения целостности цикла «данные – аналитика – действие» система разделена на функциональные подсистемы, каждая из которых выполняет чётко определённые задачи, отражённые в таблице 1. Нижеизложенное распределение обязанностей повышает отказоустойчивость: сбой в аналитической подсистеме не влияет на приём данных, а задержка в визуализации не препятствует фиксации инцидента.

Таблица 1. Функциональные подсистемы разрабатываемой системы мониторинга инцидентов

Подсистема	Ключевые функции	Результат выполнения
Подсистема приёма данных	– Подключение к камерам по протоколу RTSP/ONVIF – Декодирование и фильтрация метаданных – Синхронизация временных меток по NTP	Поток унифицированных записей, готовых к аналитике
Подсистема обнаружения инцидентов	– Детекция объекта «человек» в размеченных областях – Расчёт длины очереди и времени отсутствия сотрудника – Сопоставление фактических значений с нормативами	Событие инцидента с классификацией критичности
Подсистема хранилища и агрегации	– Запись событий в журнал с защитой от изменения – Агрегация метрик по интервалам времени – Подготовка данных для машинного обучения	Целостная историческая база для отчётности и обучения моделей
Аналитическая подсистема	– Обучение моделей кластеризации уровней нагрузки – Прогнозирование пиковых периодов на основе сезонности – Оценка эффективности распределения персонала	Прогнозные интервалы нагрузки и рекомендации
Подсистема визуализации	– Формирование дашбордов с фильтрацией по подразделениям – Построение тепловых карт загруженности – Генерация отчётов в форматах PDF/XLSX	Интерактивный интерфейс для руководства и специалистов
Подсистема оповещения	– Триггер-механизм рассылки при превышении порогов – Интеграция с почтовыми и мессенджер-шлюзами – Ведение журнала доставки	Своевременное информирование ответственных лиц
Интеграционная подсистема	– REST-API для обмена данными с медицинской ИС – Импорт справочников сотрудников и расписаний – Экспорт сводных метрик во внешние BI-системы	Сквозная связность с экосистемой учреждения
Подсистема управления доступом	– Ролевая модель (администратор, аналитик, наблюдатель) – Журналирование действий пользователей – Аутентификация через корпоративный доступ	Соблюдение требований безопасности и аудита

Концепция MVP. С помощью методологии проектирования продукта User Story Mapping ниже описана карта (таблица 2), отображающая приоритетные функциональные возможности для реализации в рамках продукта.

Таблица 2. User Story Mapping

	Хранение и обработка данных	Отображение данных	Алгоритмы машинного обучения
Сделать обязательным	Защищённое хранилище метаданных	Оперативный дашборд текущих очередей	Кластеризация интервалов загрузки
Хорошо бы сделать	Архив событий за 90 дней	Сводный отчёт-сводка за сутки	Прогноз краткосрочного увеличения потока
Можно будет сделать	Репликация базы для отказоустойчивости	Мобильное приложение администратора	Модель долгосрочного планирования смен

Минимально жизнеспособный продукт (MVP) фокусируется на реализации ключевых функциональных элементов, позволяющих продемонстрировать технологическую осуществимость концепции и экономическую перспективность проекта при оптимизации временных и ресурсных затрат. Полученные в ходе тестирования MVP эмпирические данные формируют доказательную базу для обоснования инвестиционной привлекательности полномасштабной реализации системы и определения вектора последующих итераций разработки.

Методология формулирования и верификации исследовательских гипотез. В рамках предпроектного анализа проведено комплексное маркетинговое исследование, направленное на оценку рыночного потенциала и практической значимости автоматизированной системы мониторинга инцидентов для учреждений здравоохранения. Исследовательская методология включала:

Формулирование верифицируемых гипотез:

1. Внедрение автоматизированного мониторинга приведет к снижению средней продолжительности очереди у регистрационных пунктов минимум на 10% без расширения штатной численности персонала
2. Применение технологии передачи структурированных метаданных вместо полных видеопотоков обеспечит сокращение сетевой нагрузки свыше 70% при сохранении исходной точности детекции объектов
3. Использование интерактивных тепловых карт повысит точность планирования рабочих смен регистраторов как минимум на 15% по сравнению с традиционными экспертными методами

Валидация гипотез проходила методом полуструктурированных глубинных интервью:

- Выборка исследования: 48 респондентов из 5 медицинских учреждений Тюменской области
- Целевые группы: административный персонал, сотрудники регистратур, пациенты, ИТ-специалисты
- Инструментарий: специализированный гайд интервью, включающий блоки оценки:
 - Актуальных проблем организации очередей
 - Готовности к технологической модернизации
 - Ожидаемых эффектов от внедрения системы

Результаты эмпирической верификации. Подтверждение гипотезы об эффективности мониторинга:

- 83% пациентов идентифицировали временной интервал ожидания до 10 минут как социально приемлемый (рис. 3)

Оценка пациентами времени ожидания

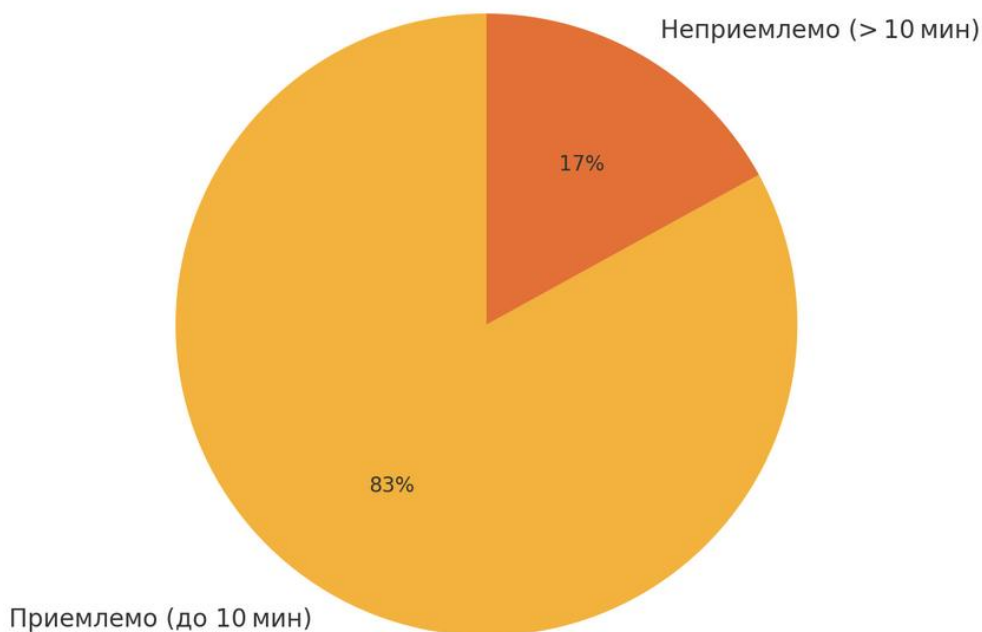


Рис. 3. Оценка времени ожидания пациентами

• Руководящий состав учреждений подтвердил достижимость 10-12% снижения продолжительности очереди при условии оперативного информирования о критических ситуациях

Верификация гипотезы о сетевой эффективности (рис. 4):

• ИТ-измерения зафиксировали снижение сетевой нагрузки на 71-74% при переходе на передачу метаданных

• Точность алгоритмов детекции сохранилась на уровне исходных видеопотоков

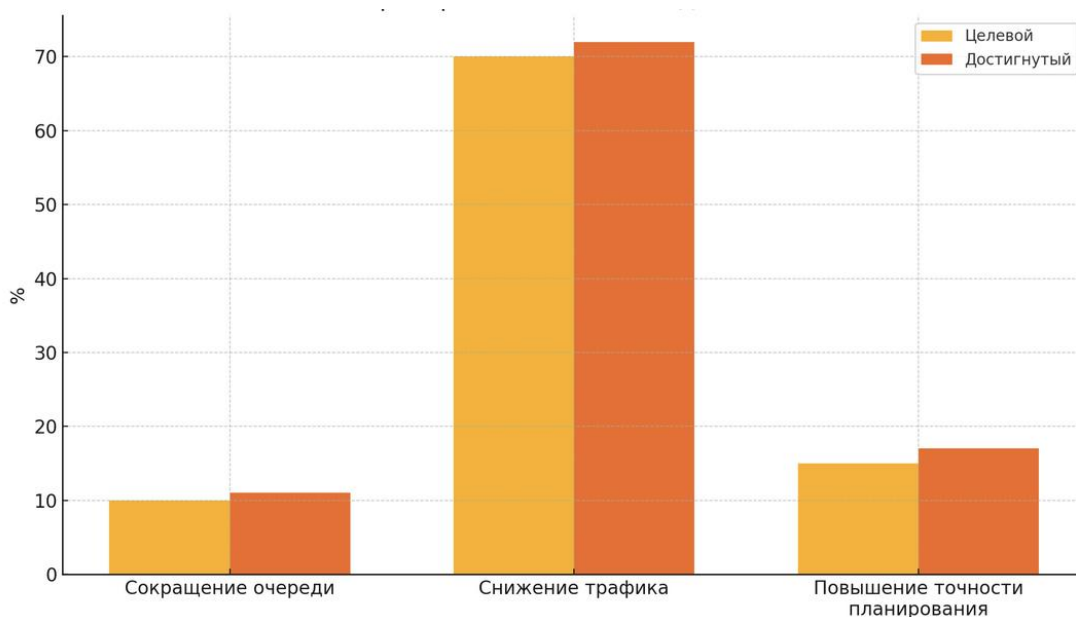


Рис. 4. Показатели проверки гипотез исследования

Подтверждение гипотезы о планировании:

- 75% респондентов отметили повышение точности планирования смен на 16-18% при использовании тепловых карт (рис. 5)

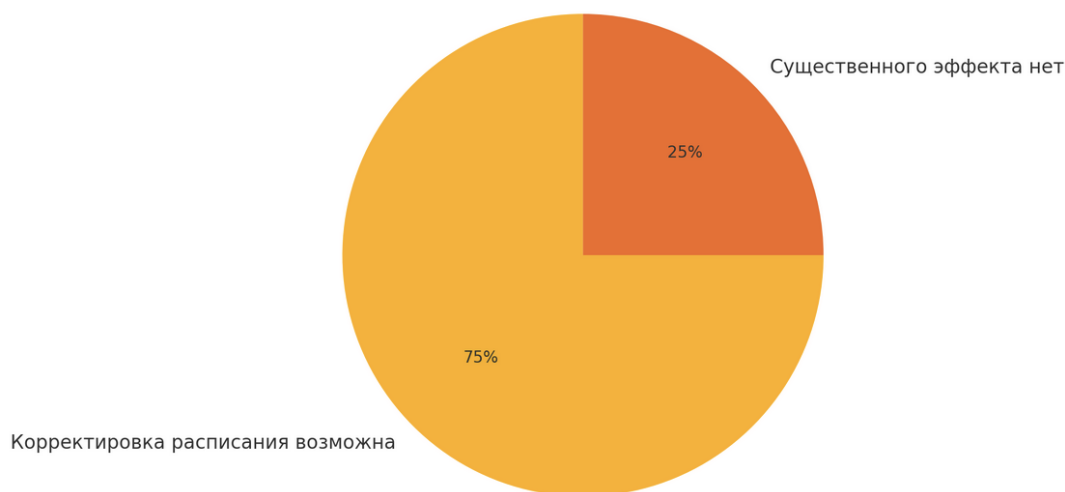


Рис. 5. Применимость тепловых карт и графиков к планированию смен

Результаты превысили исходные прогнозные показатели. Полученные данные статистически значимо подтверждают сформулированные гипотезы и обосновывают перспективность дальнейшей разработки системы.

Результаты маркетингового исследования подтверждают высокую потребность медицинских организаций в системе автоматизированного мониторинга инцидентов и демонстрируют готовность рынка к ее внедрению. Полученные данные обосновывают приоритетность функций, заложенных в MVP, и подтверждают целесообразность разработки программно-аппаратного решения.

Анализ ценностного предложения системы мониторинга на основе карты ценностей. Структурный анализ ценностного предложения системы (рис. 6) позволил выделить шесть ключевых компонентов, формирующих комплексную модель внедрения технологического решения в практику медицинских организаций. В качестве кейс-стади рассмотрена городская поликлиника №8 г. Тюмени.



Рис. 6. Карта ценностного предложения

1. Фундаментальные потребности заказчиков:

Ключевые стейкхолдеры (главный врач, заведующие отделениями, ИТ-руководство и отдел планирования) демонстрируют выраженную потребность в точных количественных метриках для прогнозирования нагрузки и оптимизации кадрового планирования. Практическим проявлением данной потребности выступает запрос руководства на ежедневные отчеты о динамике очередей, служащие основой для корректировки графика работы регистраторов на недельный период.

2. Стратегические цели внедрения:

Администрация учреждения формулирует четкие целевые показатели качества обслуживания, среди которых ключевым является требование обеспечения 90% пациентов временем ожидания не более 10 минут. Система предоставляет инструментарий для мониторинга достижения данного KPI, заменяя субъективные экспертные оценки объективными метриками.

3. Риски и барьеры внедрения:

Основные опасения заинтересованных сторон концентрируются вокруг трех аспектов:

- Потенциальные риски утечки видеоданных
- Технологическая сложность интеграции решения
- Достаточная точность прогнозных алгоритмов

ИТ-специалисты выражают обеспокоенность возможными нарушениями политик безопасности при передаче данных в облако и длительными сроками обучения прогнозных моделей.

4. Функциональные характеристики системы:

Решение обеспечивает:

- Реалтайм-детекцию критических ситуаций (отсутствие персонала при наличии очереди)
- Визуализацию нагрузки через тепловые карты
- Классификацию потока пациентов по временным интервалам

При превышении установленных пороговых значений система автоматически инициирует инцидент "Рост нагрузки" с визуализацией на дашборде и рассылкой push-уведомлений ответственным лицам.

5. Пользовательский опыт:

Интерфейсная часть системы отличается:

- Интуитивной визуализацией данных
- Мультиканальной системой оповещений
- Соответствием стандартам информационной безопасности (TLS 1.3)
- Четким разграничением прав доступа

Конкретные сценарии использования варьируются в зависимости от роли: регистраторы получают оперативные уведомления через мессенджеры, руководство работает с агрегированными отчетами в веб-интерфейсе, ИТ-персонал управляет правами доступа через административную панель.

6. Практическая эффективность:

Внедрение системы обеспечивает:

- Сокращение времени ожидания пациентов
- Оптимизацию эксплуатационных затрат
- Повышение обоснованности управленческих решений

Выводы. Пилотная эксплуатация в поликлинике №8 г. Тюмени уже привела к трем конкретным управленческим решениям на основе предоставляемых данных, подтверждая практическую значимость решения.

Созданный MVP соответствует рыночным требованиям: архитектура допускает горизонтальное масштабирование, соблюдены нормативы информационной безопасности. Успешность проекта измерена по ключевым показателям эффективности и экономической целесообразности: расчёт финансовой модели подтвердил положительный чистый приведённый доход при подключении не менее двух учреждений, а заключённые соглашения о сотрудничестве с дополнительными поликлиниками формируют реальный задел для коммерциализации.

Научная ценность работы заключается в предложенной методике совместного использования алгоритмов компьютерного зрения, кластерного анализа и пользовательских дашбордов для решения задачи оптимизации регистратур. Практическая значимость подтверждается опытно-промышленной эксплуатацией: система интегрирована в защищённый сегмент ЛВС медицинского учреждения, подготовлены эксплуатационная документация и регламенты сопровождения, а персонал прошёл обучение.

Оценка соответствия рыночным требованиям:

- Минимально жизнеспособный продукт демонстрирует:
- Возможности горизонтального масштабирования
- Соответствие требованиям информационной безопасности
- Положительные экономические показатели (NPV при подключении ≥ 2 учреждений)

Заключённые соглашения с другими медицинскими организациями создают фундамент для успешной коммерциализации решения.

Научная новизна работы заключается в разработке интегративной методике, сочетающей:

- Алгоритмы компьютерного зрения
- Методы кластерного анализа
- Интерактивные дашборды

Практическая апробация подтверждена:

- Успешной интеграцией в защищённый сегмент ЛВС действующего медучреждения
- Разработкой полного комплекта эксплуатационной документации
- Проведением обучения персонала

Полученные результаты свидетельствуют о высокой готовности решения к промышленному внедрению и его значительном потенциале для оптимизации работы регистратур медицинских учреждений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пигарев, В. А. Особенности продвижения SaaS-сервисов на B2B рынках СНГ, Европы и США / В. А. Пигарев, Е. А. Шагина // *Global and Regional Research*. – 2020. – Т. 2, № 2. – С. 203-208. – EDN LWDJTM.
2. Михайлов, М. С. Применение GraphQL для разработки веб-приложений / М. С. Михайлов, С. А. Кузьмин // *Наука настоящего и будущего*. – 2024. – Т. 1. – С. 178-182. – EDN M1HUCL.
3. Караханова, А. А. Анализ микросервисной архитектуры, монолитных приложений, архитектуры SOA / А. А. Караханова // *Синергия Наук*. – 2020. – № 46. – С. 255-262. – EDN BVOVEU.

4. Rodionov, K. Containerizing Python applications using Docker to build a microservice architecture / К. Родионов // *Universum: технические науки*. – 2024. – No. 6-6(123). – P. 30-39. – DOI 10.32743/UniTech.2024.123.6.17827. – EDN JLTZCR.
5. Чэнь, Ю. Современные инструменты и платформы для разработки микросервисной архитектуры / Ю. Чэнь // *АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ОБЩЕСТВА, науки и образования : сборник статей XVII Международной научно-практической конференции*. В 2 ч., Пенза, 20 ноября 2024 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2024. – С. 70-72. – EDN RKRIJG.
6. Баранов, М. В. Важность контейнеризации в приложениях с микросервисной архитектурой / М. В. Баранов, И. Р. Дубов // *Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения : Сборник материалов VII Всероссийской научной конференции с международным участием, Тольятти, 16–18 апреля 2024 года*. – Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2024. – С. 200-206. – EDN FDQQFS.
7. Жилина, А. А. Обеспечение безопасности виртуальной инфраструктуры, построенной на базе микросервисной архитектуры с использованием оркестратора KUBERNETES / А. А. Жилина, С. М. Володин // *Информационная безопасность: вчера, сегодня, завтра : Сборник статей по материалам V Международной научно-практической конференции, Москва, 14 апреля 2022 года*. – Москва: Российский государственный гуманитарный университет, 2022. – С. 66-72. – EDN EEQZKM.
8. Аникин, Д. А. Анализ методов авторизации и аутентификации REST API / Д. А. Аникин // *Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности*. – 2023. – Т. 8, № 5-2(31). – С. 120-124. – EDN DZKSMQ.
9. Соловьев, А. В. Дашборд как инструмент анализа данных и способ управления изменениями / А. В. Соловьев, О. В. Газизова // *Нугаевские чтения: традиции и инновации в экономической науке и практике : Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, Казань, 05–06 декабря 2024 года*. – Казань: Общество с ограниченной ответственностью "Редакционно-издательский центр "Школа", 2025. – С. 148-150. – EDN KNBAJO.
10. Багдужева, А. В. Разработка информационной системы для автоматизации деятельности организации на основе MICROSOFT SQL SERVER / А. В. Багдужева // *Инновационные технологии в науке и образовании : Материалы 4-й международной научно-практической конференции, Улан-Удэ, 28–30 августа 2015 года / Ответственный редактор Е. Р. Урмакшинова; научные редакторы С. Л. Буянтуев, Ма Тун Цай*. – Улан-Удэ: Бурятский государственный университет, 2015. – С. 186-189. – DOI 10.18101/978-5-9793-0803-6-186-189. – EDN UUFHKN.
11. Ковалюк, О. А. Анализ программных средств кэширования данных в высоконагруженных системах / О. А. Ковалюк // *Научные труды Винницкого национального технического университета*. – 2014. – № 3. – С. 6. – EDN SUFIZD.
12. Iliashenko, O. Yu. Possibilities of using computer vision for data analytics in medicine / O. Yu. Iliashenko, E. L. Lukyanchenko // *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*. – 2022. – Vol. 22, No. 2. – P. 224-232. – DOI 10.18500/1816-9791-2022-22-2-224-232. – EDN MCSLKQ.
13. Добродей, С. Г. Представление данных систем видеоаналитики в виде тепловых карт / С. Г. Добродей, А. В. Бородуля // *Системный анализ и прикладная информатика*. – 2019. – № 3. – С. 54-58. – EDN JGTQQW.
14. Лузянин, И. С. Проблемы анализа малых изменений сложных временных рядов на основе алгоритма динамической трансформации временной оси / И. С. Лузянин, А. Б. Петроченков, Б. Краузе // *Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям*. – 2016. – Т. 2. – С. 115-118. – EDN WWYQAP.
15. Оселедец, И. В. Прототипирование программных комплексов / И. В. Оселедец // *Научный сервис в сети Интернет: поиск новых решений : Труды Международной суперкомпьютерной конференции, Новороссийск, 17–22 сентября 2012 года*. – Новороссийск: Издательство Московского государственного университета, 2012. – С. 404-411. – EDN SXFKNP.
16. Азизова, К. И. Стратегия MVP как эффективный инструмент развития бизнеса / К. И. Азизова, Я. В. Мещерякова // *Современные тенденции психологических исследований : Материалы I Всероссийской студенческой научно-практической конференции, Севастополь, 17 мая 2022 года*. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2022. – С. 181-186. – EDN TYOJQW.
17. Видеоаналитика – российский рынок [Электронный ресурс]. – URL: <https://vk.cc/co3UO9> (дата обращения 15.03.2025).

18. Багаев, И. И. Анализ понятий нейронная сеть и сверточная нейронная сеть, обучение сверточной нейросети при помощи модуля TensorFlow / И. И. Багаев // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2020. – Т. 8, № 1. – С. 15-22. – DOI 10.18503/2306-2053-2020-8-1-15-22. – EDN IZBILN.
19. Оценка российского рынка видеоналитики в 2024 году [Электронный ресурс]. – URL: gladar.ru/blog/ryinok-videoanalitiki-v-rossii-vostrebovannost-i-perspektivy (дата обращения 15.04.2025)
20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023618703 Российская Федерация. Программное обеспечение "Платформа Третье Мнение" : № 2023617849 : заявл. 27.04.2023 : опубл. 27.04.2023 / М. М. Абдулмажидов, А. М. Громов, И. А. Черезов [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Платформа Третье Мнение". – EDN NPHRFI.
21. Видеосерверы и системы видеоналитики Vizzara [Электронный ресурс]. – URL: <https://vizzara.ru/> (дата обращения 15.04.2025)
22. Команда экспертов по машинному обучению [Электронный ресурс]. – URL: <https://visionlabs.ru/> (дата обращения 15.04.2025)
23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661221 Российская Федерация. Интеграция видеооборудования ONVIF : № 2015615975 : заявл. 02.07.2015 : опубл. 21.10.2015 / И. Е. Гранков ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «АРМО-Системы». – EDN KRTMOK.
24. Ветошкин, В. М. Методика разработки концептуальной информационной модели системы баз данных / В. М. Ветошкин, О. В. Саяпин, С. В. Чискидов // Техника средств связи. – 2018. – № 1(141). – С. 74-78. – EDN VJFAAH.
25. Субботин, А. Н. Логическая модель данных для систем интеллектуального видеонаблюдения / А. Н. Субботин, Н. А. Жукова // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – 2022. – Т. 1. – С. 154-157. – EDN FBLUWL.
26. Захарченко, В. Ф. Контейнеризация и развертывание приложений с помощью Docker и Docker-compose / В. Ф. Захарченко, А. Н. Бизюк // Материалы докладов 56-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов : В ДВУХ ТОМАХ, Витебск, 19 апреля 2023 года. Том 2. – Витебск: Витебский государственный технологический университет, 2023. – С. 80-82. – EDN AYMVYD.
27. Буц, А. Е. Оптимизация работы docker контейнеров / А. Е. Буц // Парадигма. – 2025. – № 3-2. – С. 3-8. – EDN RSLMLE.
28. Кирьянов, В. А. Анализ использования реляционных систем управления базами данных MySQL и PostgreSQL при разработке современного программного обеспечения / В. А. Кирьянов, К. А. Буторин, А. А. Сухов // Наукосфера. – 2024. – № 4-1. – С. 153-158. – DOI 10.5281/zenodo.10955344. – EDN RIUMCI.
29. Дроботенко, Д. А. Сравнительный анализ средств обеспечения безопасности web-сервисов / Д. А. Дроботенко, И. В. Гуров, М. С. Кальшин // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. – 2016. – Т. 6, № 4. – С. 550-554. – EDN YLNLES.
30. Гинзбург, И. Б. Сравнение возможностей автономного веб-приложения с другими видами клиентских приложений для облачных информационных систем / И. Б. Гинзбург // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № 11. – С. 204-207. – EDN YTOMKT.
31. Сороченко, Р. А. Использование программы стоп для выполнения сложных и трудоемких задач веб-приложений / Р. А. Сороченко, Е. В. Крылов, В. К. Аникин // Актуальные научные исследования в современном мире. – 2018. – № 11-2(43). – С. 66-70. – EDN YQNGST.
32. Коберник-Березовский, Ю. А. Использование фреймворка GRPC для передачи Больших данных / Ю. А. Коберник-Березовский, В. В. Скакун // Компьютерные технологии и анализ данных (СТДА'2020) : материалы II Международной научно-практической конференции, Минск, 23–24 апреля 2020 года. – Минск: Белорусский государственный университет, 2020. – С. 237-241. – EDN UVYMXL.

Поступила в редакцию 14.07.2025 г., рекомендована к печати 12.08.2025 г.

**OPTIMIZATION OF REGISTRATION AND WAITING AREAS IN MEDICAL ORGANIZATIONS
BASED ON AUTOMATED MONITORING USING COMPUTER VISION**

Nikolenko T.A., Ermakov N.V., Danilov O.F.

The article discusses an intelligent complex system designed for automatic monitoring of queues of visitors to medical institutions. The system processes signals from installed video surveillance cameras, detects long-term absence of a registrar from the workplace, generates heat maps of patient queue loads and is able, based on the collected information, to provide the management of the medical institution with substantiated recommendations when making personnel management decisions.

Keywords: computer vision, internet of things, machine learning, medical analytical system.

Николенко Татьяна Александровна

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры интеллектуальных систем и технологий ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»,
Российская федерация, г. Тюмень.
E-mail: nikolenkota@tyuiu.ru

Nikolenko Tatiana Aleksandrovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Intelligent Systems and Technologies of Tyumen Industrial University,
Russian Federation, Tyumen.

Ермаков Николай Владимирович

директор по развитию ООО «Ин Нова»,
Российская федерация, г. Тюмень.
E-mail: n.ermakov@innovalab.ru

Ermakov Nikolai Vladimirovich

Development Director of In Nova LLC,
Russian Federation, Tyumen.

Данилов Олег Федорович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой интеллектуальных систем и технологий ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»,
Российская федерация, г. Тюмень.
E-mail: danilovof@tyuiu.ru

Danilov Oleg Fedorovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Intelligent Systems and Technologies of Tyumen Industrial University,
Russian Federation, Tyumen.

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ВЫБОРЕ НАУЧНОГО ЖУРНАЛА

© 2025 Тугашова Л.Г.

Для преподавателей и научных сотрудников актуальным является вопрос выбора журнала для публикации статьи. Целью исследования является разработка формулы интегрального показателя выбора журнала для публикации статьи, имеющего переменную структуру. Предложен способ получения интегрального показателя, позволяющий авторам самим формировать рейтинг научных журналов с учетом выбранных факторов. Показаны этапы алгоритма составления рейтинга журналов переменной структуры. При расчете интегрального показателя имеется возможность самостоятельно формировать последовательность значимости выбранных факторов. С применением полученного выражения вычислены значения интегрального показателя для журналов научной специальности 2.3.3. Разработанные математические модели могут использоваться для анализа комплекса наукометрических и других показателей при принятии решения по выбору журналов для представления научной статьи.

Ключевые слова: журнал, статья, библиометрические показатели, интегральный показатель, факторы, шкала Фишберна.

Введение. Для образовательного или научного учреждения публикации сотрудников являются одним из показателей рейтинга организации. Для организаций, ведущих научную деятельность, применяется методика расчета комплексного балла публикационной результативности (КБПР). Методика расчета КБПР изложена в письме Минобрнауки России от 13.01.2025 №МН-13/9.

Международными индексами научного цитирования являются Web of Science (WoS) и Scopus. Рейтинг журнала оценивается путем определения квартиля (Q1-Q4), то есть ранга научного журнала, зависящего от его цитируемости. Для базы данных WoS квартиль определяется импакт-фактором Journal Citation Reports (JCR), а для Scopus – показателем SCImago Journal Rank (SJR). Существуют национальные индексы цитирования: China Science Citation Database, Citation Database for Japanese Papers, Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) и др. OpenAlex – развивающийся ресурс открытого доступа, являющийся альтернативой коммерческим источникам библиометрических данных.

В настоящее время доступ российских научных организаций к WoS и Scopus ограничен. В России применяется «Белый список» научных журналов, представляющий собой перечень рекомендованных изданий, в которых российские ученые могут публиковать свои работы. Рейтинг российских журналов определяется различными показателями. Библиометрические показатели журналов приведены на сайте НЭБ elibrary.ru в разделе «Анализ публикационной активности журнала».

Важным показателем научной значимости журнала является импакт-фактор РИНЦ (на сегодня существует несколько его видов). Высокое значение импакт-фактора РИНЦ не всегда свидетельствует о высоком качестве журнала. Узкопрофильные журналы могут иметь невысокий импакт-фактор, высокий коэффициент самоцитирования, но это не говорит о том, что статьи не интересны или не обладают научной значимостью, просто они рассчитаны на узкий круг специалистов.

В РИНЦ применяется интегральный показатель Science Index (SI). Одна из основных задач данного рейтинга – дать возможность сравнивать между собой журналы, относящиеся к различным дисциплинам [1].

Интегральный показатель SI служит основой для составления рейтинга журналов РИНЦ и не может быть единственным определяющим показателем при выборе журнала для публикации статьи.

На сайте ВАК России приведен перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и на соискание ученой степени доктора наук.

Таким образом, при выборе журнала для опубликования научной статьи автору необходимо сориентироваться в многообразии журналов.

Исследование, приведенное в статье, посвящено поиску ответов на следующие вопросы:

- какие факторы, библиометрические показатели учитывает автор при выборе российского научного журнала при публикации научной работы?
- каким образом сформировать систему по выбору журналов, какой математический алгоритм подбора применить?

Обзор литературы. Все существующие методики оценки научных журналов можно разделить на две группы: библиометрические показатели и экспертные методы. В настоящее время получили применение также альтметрические методы.

Обзор литературы показал, что наиболее часто предлагаются методики для оценки экономических и технических журналов. Примером методик на основе библиометрических показателей является работа [2]. В статье [2] в качестве дополнительного показателя предложено учитывать количество высокоцитируемых статей. Общее ранжирование журналов осуществлялось по методике многомерного сравнительного анализа.

Примером разработки метода экспертных оценок является проект Управления академической экспертизы университета Высшая Школа Экономики. В работе [3] приведена методика кластерного рейтинга, в основе которого лежат данные экспертного опроса.

Авторы [4] при исследовании числа цитируемых ссылок в публикациях применяли регрессионный анализ.

В работе [5] при анализе библиометрических показателей научных журналов по техническим специальностям применен кластерный анализ.

Альтметрики – это новые методы наукометрии, которые оценивают результаты исследовательской деятельности не на основе числа цитирований публикаций в научных журналах (академический вес, scholarlyimpact), а по их присутствию, упоминанию и использованию в интернете и традиционных СМИ (общественный вес, socialimpact).

В работе [6] применялось анкетирование в режиме онлайн со шкалой Ликерта. Выполнено ранжирование факторов в следующем порядке: тематическое соответствие, рецензирование, репутация, целевая читательская аудитория, импакт-фактор, сохранение авторского права, скорость издания, стоимость обработки статьи.

В работе [7] сделан вывод, что OpenAlex может быть использован в качестве информационного ресурса для поиска разнородной информации и альтернативного инструмента библиометрического анализа.

Целями опубликования научной работы могут быть ознакомление с результатами научного исследования широкой аудитории, участие в конкурсах и грантах, выполнение пункта трудового договора, написание кандидатской или докторской диссертации и др.

Интегральный показатель выбора журнала для публикации статьи должен быть понятным, простым в вычислении, чтобы им сумел воспользоваться любой автор, публикующий статью: студент, магистрант, соискатель ученой степени, преподаватель вуза, научный работник и т.д. Интегральный показатель должен учитывать в своей структуре цель, с которой автор публикует статью, путем ранжирования факторов по значимости. Кроме этого, исходные данные для его вычисления должны находиться в открытом доступе.

Цель исследования. Целью исследования является разработка формулы интегрального показателя выбора журнала для публикации статьи, имеющего переменную структуру.

Основная задача – составить алгоритм, который поможет авторам, решившим опубликовать статью в российском журнале, сориентироваться в многообразии научных журналов и их показателях и составить свой рейтинг.

Выполнен выбор методов исследования, необходимых для решения поставленной задачи. В работе применялись следующие количественные методы сбора и анализа данных: анкетный опрос, кластерный анализ, ранжирование.

Анкета содержала следующий вопрос: «Выразите, пожалуйста, свое мнение о важности перечисленных показателей при выборе журнала для публикации научной статьи». Затем перечислены наукометрические и другие показатели журналов: периодичность выхода журнала, является ли журнал платным или бесплатным для авторов, форма публикации (электронная/бумажная), рейтинг журнала и т.п. Применялась шкала оценок от 0 до 10. Респондентами являлись преподаватели и аспиранты образовательных учреждений, а также работники предприятия, ведущие научно-исследовательскую работу. В результате были собраны и обработаны ответы участников. Показатели журналов отбирались по среднему значению набранных баллов. Метод «Анкетный опрос» применялся для выбора факторов.

Для того, чтобы получить выборку по показателям журналов, использовались данные НЭБ, «Белого списка», Перечня ВАК.

Для решения задачи выбора научного журнала для публикации научно-исследовательских работ разработана информационная система, представляющая собой базу данных научных журналов с удобным пользовательским интерфейсом. Внимание уделено тематическим направлениям журналов по специальностям ВАК по техническим наукам. По заданным критериям можно выбрать несколько научных журналов.

Методы и алгоритм составления интегрального показателя. Для определения рейтинга выбранных научных журналов применялось ранжирование. Для его осуществления выбран метод Фишберна, являющийся сравнительно простым и понятным. В данном методе используется убывающая по значимости последовательность факторов. В нашем случае предложен расчет весовых коэффициентов для последовательности факторов смешанной (равной и убывающей) значимости.

Приведем этапы составления предлагаемого интегрального показателя выбора российских журналов. Для получения формулы интегрального показателя выберем показатели, которые необходимо учитывать при выборе журнала для публикации. К таким показателям отнесены следующие: двухлетний импакт-фактор РИНЦ, число загрузок статей за год, периодичность издания, платность публикаций для авторов.

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ показывает соотношение числа ссылок, которые получил журнал в текущем году на статьи, опубликованные в нем за два предыдущих года, к числу статей, опубликованных в этом журнале за этот же период.

Число загрузок статей в год показывает востребованность статей, опубликованных в журнале, а также наличие доступа читателей к архиву статей и свежим выпускам.

Периодичность издания влияет на скорость опубликования статьи. В определенной степени на скорость также влияют сроки и качество рецензирования, была ли отправлена статья на доработку, а также вид издания (электронный или печатный журнал). В основном, журналы выходят со следующей периодичностью: 12, 6, 4 выпуска в год.

Платность публикаций для авторов определяет, берется ли плата с автора за публикацию, обработку статей или источниками финансирования журнала являются распространение по подписке, учредитель и т.д. Определим следующие формы данного показателя: бесплатный для всех авторов; бесплатный для определенной категории авторов (аспирантов), для остальных платный; платный для всех авторов.

Так как исходные данные разной размерности, то необходима нормировка. Нормировка факторов по среднему значению имеет вид:

$$X_{ij} = \frac{x_{ij}}{\bar{x}_j}, \quad (1)$$

где i – номер определенного журнала; j – номер фактора; x_{ij} – значение фактора определенного журнала; \bar{x}_j – среднее значение фактора по всем журналам; X_{ij} – нормированное значение фактора.

Если фактор задается отдельными отсчетами или словесно, то осуществляется переход к дискретным значениям.

При получении формулы интегрального показателя выбора научного журнала необходимо определить веса факторов. В одном случае они могут быть равнозначными:

$$w_{EQj} = \frac{1}{n}, \quad (2)$$

где n – число факторов.

В другом случае принимается, что факторы отличаются значимостью. Тогда веса предлагается определять по шкале [8]:

$$w_{Fj} = \frac{2(n-j+1)}{n(n+1)}, \quad j=1..n, \quad (3)$$

где j – ранг значимости (номер) фактора.

Возможен вариант, когда факторы имеют веса смешанной (равной и убывающей) значимости. Тогда веса факторов для i -того журнала предлагается определять следующим образом:

$$\begin{aligned} &\text{если } X_{ij} \approx X_{i(j+1)}, \text{ то } w_j = w_{j+1}; \\ &\text{если } X_{ij} \succ X_{i(j+1)}, \text{ то } w_j = w_{Fj}, w_{j+1} = w_{F(j+1)}; \\ &j = \overline{1, n}; i = \overline{1, m}. \end{aligned} \quad (4)$$

В любом из приведенных случаев (2)-(4) должно выполняться условие:

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1.$$

С учетом рассчитанных весов факторов формула интегрального показателя выбора журнала имеет следующий вид:

$$P = \sum_{j=1}^n w_j X_{ij}. \quad (5)$$

Особенность предлагаемого интегрального показателя – его переменная структура. Переменные X_{ij} не связаны с конкретными факторами. Привязку факторов к переменным X_{ij} в соответствии с их значимостью назначает автор в зависимости от целей написания и опубликования научной статьи. Затем формируется последовательность значимости факторов определенной структуры. Веса определяются для разных случаев: равной, различной и смешанной значимости факторов.

Таким образом, предлагаемый алгоритм выбора журнала для публикации статьи состоит из следующих шагов.

1. Предварительный выбор научных журналов, которые публикуют статьи требуемой тематики по научной специальности. Библиометрические показатели журналов (импакт-фактор РИНЦ в первую очередь) каждого направления отличаются диапазоном изменения.

2. Формирование матрицы исходных данных по выбранным значимым факторам с использованием информации открытого доступа. Предварительная обработка информации включает нормировку факторов (1) и переход к дискретным переменным.

3. Формирование различных последовательностей значимости факторов и расчет весов факторов с помощью формул (2), (3) или (4) в зависимости от вида последовательности.

4. Привязка значимых факторов к переменным последовательности в зависимости от цели опубликования статьи и составление необходимой последовательности значимости факторов. Вычисление интегрального показателя по формуле (5) для всех отобранных журналов и формирование их рейтинга.

По полученным результатам выбирается журнал, в который подается научная статья. Изучаются требования к статьям, приведенные на сайте этого журнала и т.д.

Результаты. Для определенности примем, что необходимо выбрать журналы для публикации статьи в российском журнале по научной специальности 2.3.3 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами». На первом шаге с помощью информационной системы по заданным диапазонам критериев определены журналы по вышеназванной научной специальности.

На втором шаге получены значения показателей (факторов) выбранных журналов: двухлетнего импакт-фактора РИНЦ, числа загрузок статей за год, периодичности издания, платности публикаций для авторов.

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ и число загрузок статей за год нормированы по среднему значению по формуле (1). Два следующих показателя переведены в дискретную форму. Периодичность издания определена следующими дискретными значениями: 12 выпусков в год соответствует значению 1; шесть выпусков – значению 0,75; четыре выпуска – значению 0,5; два выпуска – 0,25; один выпуск – 0. Платность публикаций для авторов переводится в дискретную форму следующим образом: 1 – бесплатный журнал для всех авторов; 0,5 – бесплатный для определенной категории авторов (аспирантов), для остальных платный; 0 – платный для всех авторов.

В таблице 1 приведены нормированные и дискретные значения вышеперечисленных факторов. Принято, что на первом шаге отобрано 5 журналов-кандидатов для публикации статьи определенной тематики.

Таблица 1. Показатели (факторы) журналов

Журнал	Двухлетний импакт-фактор РИНЦ (IF)	Число загрузок статей за год (ND)	Периодичность издания (FP)	Платность публикаций для авторов (PP)
Журнал 1	1,12	0,14	1	1
Журнал 2	0,50	2,32	0,75	0
Журнал 3	1,29	0,29	1	0,5
Журнал 4	0,72	0,14	0,5	1
Журнал 5	1,33	1,41	0,5	1

На третьем шаге (табл. 2) сформированы возможные последовательности значимости факторов и вычислены веса значимых факторов по формулам (2)-(4).

Таблица 2. Веса четырех факторов: равнозначных, по шкале Fishburn и смешанной значимости

No	Последовательность	Веса факторов		
		w_1	w_2	w_3
1	$X_1 \approx X_2 \approx X_3 \approx X_4$	0,25	0,25	0,25
2	$X_1 \succ X_2 \succ X_3 \succ X_4$	0,40	0,30	0,20
3	$X_1 \succ X_2 \approx X_3 \approx X_4$	0,40	0,20	0,20
4	$X_1 \approx X_2 \succ X_3 \approx X_4$	0,35	0,35	0,15
5	$X_1 \approx X_2 \approx X_3 \succ X_4$	0,30	0,30	0,30
6	$X_1 \succ X_2 \succ X_3 \approx X_4$	0,40	0,30	0,15
7	$X_1 \succ X_2 \approx X_3 \succ X_4$	0,40	0,25	0,25
8	$X_1 \approx X_2 \succ X_3 \succ X_4$	0,35	0,35	0,20

Последовательность, приведенная на строке 1 таблицы 2, соответствует факторам равной значимости. Последовательность на строке 2 соответствует факторам различной значимости, расположенным в порядке ее убывания. Строки 3-8 определяют последовательности факторов смешанной значимости.

На четвертом шаге для примера рассмотрены две ситуации для последовательности значимости факторов, приведенной в таблице 2, на строке 4. В зависимости от важности факторов сформированы следующие их последовательности: $IF \approx PP \succ FP \approx ND$ и $FP \approx ND \succ IF \approx PP$.

В результате расчета интегрального показателя по формуле (5) получены значения, приведенные в таблице 3.

Таблица 3. Результаты расчета интегрального показателя переменной структуры

Журнал	$IF \approx PP \succ FP \approx ND$		$FP \approx ND \succ IF \approx PP$	
	Показатель	Ранг	Показатель	Ранг
Журнал 1	0,93	2	0,77	5
Журнал 2	0,64	6	1,21	1
Журнал 3	0,81	3	0,82	4
Журнал 4	0,68	4	0,52	6
Журнал 5	0,98	1	1,09	2

Из таблицы 3 видим, что для первого случая самым подходящим журналом для подачи статьи является Журнал 5, для второго случая – Журнал 2. Если значения интегрального показателя равны, то ранг журнала назначаем в зависимости от того, где первый значимый фактор выше. Подобным образом можно составить рейтинги журналов для других последовательностей значимости факторов.

Выводы. Таким образом, предложен алгоритм расчета интегрального показателя переменной структуры для выбора научного журнала для публикации статьи. Данный показатель должен учитывать различные публикационные цели, которыми может руководствоваться исследователь при подготовке рукописи. Выполнен подбор факторов, влияющих на выбор научного журнала для опубликования статьи.

Предложен расчет весовых коэффициентов в формуле интегрального показателя для последовательности факторов смешанной (равной и убывающей) значимости, представленный формулой (4).

Показан пример выбора российских научных журналов по научной специальности 2.3.3 с применением полученной модели (5) по четырем факторам. При необходимости количество журналов, набор влияющих факторов, их количество могут быть различными.

Предложенный алгоритм позволяет упростить процедуру выбора журналов для публикации научных статей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Григорьева, Е. И. Хороши ли журналы, в которых размещены ваши статьи? / Е. И. Григорьева, З. Р. Зарипова, К. П. Кокарев // Полис. Политические исследования. – 2015. – № 3. С. 147-159. – DOI <https://doi.org/10.17976/jpps/2015.03.10>.
2. Третьякова, О. В. Импакт-рейтинг экономических журналов академического сектора: критерии и методика построения / О. В. Третьякова // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2018. – Т. 11. – № 3. – С. 179–194. – DOI 10.15838/esc.2018.3.57.12.
3. Рубинштейн, А. Я. Ранжирование российских экономических журналов: научный метод или "игра в цифры"? / А. Я. Рубинштейн // Журнал Новой экономической ассоциации. – 2016. – № 2(30). – С. 162-175. – DOI 10.31737/2221-2264-2016-30-2-7. – EDN WFAYZN.
4. Bornmann, L. Growth rates of modern science: A bibliometric analysis based on the number of publications and cited references/ L. Bornmann, R. Mutz // Journal of the Association for Information Science and Technology. – 2014. – 66(11). – P. 1–28. – DOI 10.1002/asi.23329.
5. Тугашова, Л. Г. Анализ показателей публикационной активности / Л. Г. Тугашова // Системный анализ в науке и образовании. – 2021. – № 2. – С. 77-82. – EDN EYMQYV.
6. Dalton, M. A dissemination divide? The factors that influence the journal selection decision of Library & Information Studies (LIS) researchers and practitioners / M. A. Dalton // Library and Information Research. – 2013. – V. 37. – № 115. – P. 33–57. – DOI 10.29173/lirg553.
7. Редькина, Н. С. Российская наука в системе открытых научных знаний OpenAlex / Н. С. Редькина // Управление наукой: теория и практика. – 2024. – Т. 6. – № 4. – С. 86–104. – DOI 10.19181/sntp.2024.6.4.5.
8. Фишберн, П. С. Теория полезности для принятия решений / пер. с англ. В.Н. Воробьевой и А.Я. Кируты // Под ред. Н. Н. Воробьева. – М: Наука, 1978. – 352 с.

Поступила в редакцию 15.07.2025 г., рекомендована к печати 18.08.2025 г.

APPLICATION OF THE INTEGRAL INDICATOR OF THE VARIABLE STRUCTURE IN THE
SELECTION OF A SCIENTIFIC JOURNAL

Tugashova L.G.

For teachers and researchers, the issue of choosing a journal for publishing an article is relevant. The purpose of this study is to develop a formula for an integral indicator of choosing a journal for publishing an article that has a variable structure. A method for obtaining an integral indicator is proposed, which allows authors to form their own rating of scientific journals based on selected factors. The stages of the algorithm for creating a rating of journals with a variable structure are presented. When calculating the integral indicator, it is possible to independently determine the sequence of importance of the selected factors. Using the obtained expression, the values of the integral indicator for journals of scientific specialty 2.3.3. were calculated. The developed mathematical models can be used to analyze a set of scientometric and other indicators when making decisions on the choice of journals for submitting a scientific article.

Keywords: journal, article, bibliometric indicators, integral indicator, factors, Fishburn scale.

Тугашова Лариса Геннадьевна

кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры автоматизации и информационных
технологий ГАОУ ВО Альметьевский
государственный технологический университет
«Высшая школа нефти»,
Российская Федерация, Республика Татарстан,
г. Альметьевск.
E-mail: tugashova@yandex.ru

Tugashova Larisa Gennadevna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at Department of Automation and
Information Technologies of Almetievsk State
Technological University «Higher School of
Petroleum»,
Russian Federation, Republic of Tatarstan,
Almetievsk.

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НАНОЖИДКОСТЕЙ
С УЧЕТОМ ПОЛИДИСПЕРСНОСТИ НАНОЧАСТИЦ**

© 2025 *Ряжских А.В.*

Представлен подход для анализа зависимости теплопроводности наножидкости от полидисперсности наночастиц с использованием функции плотности распределения объемной доли дисперсной фазы по размерам, которая явным образом связана со счетной функцией распределения наночастиц по размерам. Получено соотношение для расчета относительной теплопроводности как функции объемной доли и функции распределения наночастиц по размеру. В предположении, что дисперсная фаза распределена по Гауссовскому закону, определена истинная относительная теплопроводность наножидкости как среднеинтегральное значение на интервале изменения относительного размера наночастиц. На примере обработки экспериментальных данных по теплопроводности наножидкостей SiO_2 /терминал-60 и Al_2O_3 /вода показано влияние степени полидисперсности наночастиц на их теплопроводность. Установлено, что уменьшение полидисперсности наночастиц приводит к повышению теплопроводности наножидкостей.

Ключевые слова: наночастицы, наножидкость, теплопроводность, полидисперсность.

Введение. Появление наножидкостей как теплоносителей нового класса [1] требуют уточнения их теплофизических характеристик, в частности, теплопроводности. Это связано с тем, что применяются различные методы и устройства для идентификации теплопроводности одних и тех же наножидкостей, причем связь между ними при интерпретации неочевидна [2] ввиду высокой чувствительности и зависимости от характеристик исходных образцов. Используется два основных способа получения наножидкостей: одноэтапный и двухэтапный.

Одноэтапный способ обеспечивает синтез наножидкостей за один шаг, избегая возможного окисления наночастиц и реализуя однородность их распределения по объему несущей среды, повышая тем самым стабильность наножидкостей [3]. Однако существующие разновидности одноэтапного способа (прямое выпаривание проволоки при создании высокого напряжения, ультразвуковое суспендирование наночастиц под флюсом, химическое осаждение и др.) [4, 5] не обеспечивают контролируемую полидисперсность наночастиц.

В двухэтапном способе вначале подготавливается порошок наночастиц, который затем диспергируется в базовую жидкость в условиях гидродинамического сдвига [6] или с помощью ультразвукового воздействия [7]. Основным недостатком такой технологии является образование кластеров и агломератов частиц, поэтому для нивелирования этого процесса добавляются поверхностно-активные вещества, повышающие устойчивость структуры наножидкостей. Тем не менее и при этом способе наблюдается существенная полидисперсность наночастиц в наножидкости, причем функция плотности распределения по размерам близка по своей форме к Гауссовскому виду [8].

Таким образом получение монодисперсных наночастиц или близких к ним в настоящее время практически невозможно, т.к. в формировании их размерного ряда участвует большое количество факторов [9], поэтому наночастицы любой природы независимо от способа получения имеют полидисперсную характеристику. В связи с этим необходимо оценить влияние полидисперсности наночастиц на величину теплопроводности наножидкостей, используя имеющиеся теоретические и экспериментальные данные по теплопроводности наножидкости.

Наиболее точный метод определения теплопроводности наножидкостей, несомненно является экспериментальный, но огромное количество возможных комбинаций наночастицы-базовая жидкость и идентификация их теплопроводности из опытных данных в зависимости от реперных параметров (концентрация, размер наночастиц, температура и т. д.) переводит эту проблему в разряд трудноразрешимых. Более того, уже полученный массив данных содержит противоречивую информацию о трендах теплопроводности различных наножидкостей в зависимости от реперных параметров [10]. Поэтому была запущена генерация моделей, объясняющих и прогнозирующих повышенную теплопроводность наножидкостей [11], но полидисперсность наночастиц в них учитывалась лишь указанием среднего размера, что некорректно характеризует реальное распределение наночастиц по размерам. Следует отметить, что, по-видимому, [12] является первой попыткой формализовать влияние полидисперсности наночастиц на теплопроводность на основе теории эффективной среды и теории фракталов, но неопределённость параметра теплопроводности кластеров не позволяет верифицировать истинные значения теплопроводности наножидкостей. В [13] показано, что агрегация наночастиц является одним из механизмов, который увеличивает теплопроводность наножидкостей, что, по-существу, косвенно подтверждает влияние полидисперсности наночастиц на теплопроводность наножидкостей. Но так ли это во всех случаях пока не ясно.

Целью представленного анализа является оценка теплопроводности наножидкостей с учетом степени полидисперсности наночастиц.

Модель. Найдем связь между нормированной счетной функцией плотности распределения наночастиц по размерам l [14]:

$$f_N(l) = dn(l)/(Ndl),$$

где $n(l)$ – количество частиц размера l ; $dn(l)$ – число частиц фракции dl ; N – общее число частиц в рассматриваемом объеме V наножидкости; с нормированной функций распределения объемной доли наночастиц по размеру:

$$f(l) = d\varphi(l)/(\Phi dl),$$

где $\varphi(l)$ – объемная доля наночастиц размера l ; $d\varphi(l)$ – объемная доля частиц фракции dl ; Φ – объемная доля частиц в объеме V ; в виде:

$$f_N(l) = \frac{V\Phi}{k_V l^3 N} f_\Phi(l),$$

где k_V – коэффициент формы наночастиц. Т.к. объем всех наночастиц равен $V_p \approx V\Phi$, а с другой стороны $V_p = k_V \bar{l}^3 N$, где \bar{l} – среднечисленный размер наночастиц в системе, равный:

$$\bar{l} = \int_0^{\infty} l f_N(l) dl,$$

поэтому из (1) следует:

$$f_N(l) = \left(\frac{\bar{l}}{l}\right)^3 f_{\Phi}(l). \quad (2)$$

Вводя относительные переменные:

$$L = \bar{l}/l, \quad F_N(L) = \bar{l} f_N(l), \quad F_{\Phi}(L) = \bar{l} f_{\Phi}(l),$$

соотношение (2) с предварительной нормировкой трансформируется в:

$$F_{\Phi}(L) = L^3 F_N(L) / \int_0^{\infty} L^3 F_N(L) dL.$$

Для дальнейшего анализа выбрано характерное теоретико-экспериментальное соотношение для прогнозирования теплопроводности наножидкости из класса соотношений, в который явным образом входит размер наночастиц и учитывается броуновская диффузия [15]:

$$\lambda_{pf}(\varphi, l) = \lambda_f \left[1 + \frac{\lambda_p \varphi l_f}{\lambda_f (1 - \varphi) l} \right], \quad (3)$$

где λ_{pf} , λ_f , λ_p – теплопроводности наножидкости, базовой жидкости и наночастиц; φ – объемная доля твердой фазы в наножидкости; l_f – «эффективный» размер псевдочастиц базовой жидкости, зависящий от физико-химических характеристик наножидкости.

Соотношение (3) представлено в виде:

$$\Lambda_{pf}(\Phi, L) = \frac{\lambda_{pf}(\varphi, l)}{\lambda_f} = 1 + \frac{\Lambda \varphi(\Phi, L)}{[1 - \varphi(\Phi, L)]} \frac{L_f}{L}, \quad (4)$$

где $L_f = l/\bar{l}$; $\Lambda = \lambda_p/\lambda_f$; $\varphi(\Phi, L) = \Phi F_{\Phi}(L)$.

Таким образом итоговое соотношение для среднеинтегральной относительной теплопроводности наножидкости с учетом полидисперсности наночастиц таково:

$$\bar{\Lambda}_{pf}(\Phi) = \frac{1}{L_{\max} - L_{\min}} \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} \Lambda_{pf}(\Phi, L) dL,$$

где L_{\min} , L_{\max} – минимальный и максимальный относительные размеры наночастиц.

Анализ. Воспользуемся экспериментальными данными по теплопроводности наножидкостей SiO_2 /синтетическая базовая жидкость «терминал 60» и Al_2O_3 /вода [16] (рис. 1). Для $L=1$ и $\varphi(\Phi, 1) \ll 1$ из (4) следует:

$$\Lambda_{pf}(\Phi, L) \approx 1 + \Lambda \Phi L_f. \quad (5)$$

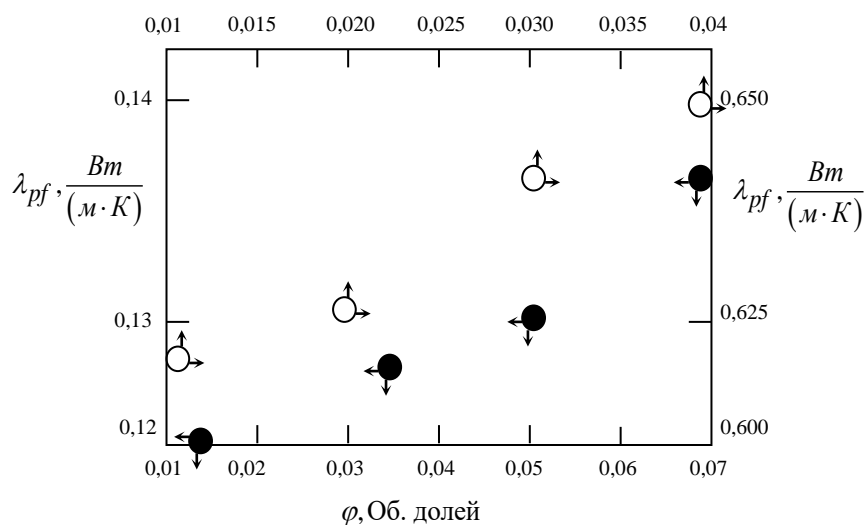


Рис. 1. Экспериментальные данные по теплопроводности наножидкостей: ● - $\text{SiO}_2/\text{терминал-60}$, $\bar{l} = 15\text{ нм}$; $\lambda_p = 0,02 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $\lambda_f = 0,116 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; ○ - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{вода}$, $\bar{l} = 38,4\text{ нм}$; $\lambda_p = 30 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $\lambda_f = 0,603 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$

Методом наименьших квадратов определены для указанных наножидкостей L_f , которые равны 12,87 и 0,042 соответственно. Безразмерная счетная функция плотности распределения по размерам, как правило [17], имеет Гауссовский вид:

$$F_N(L) = \frac{1}{\bar{\sigma}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(L-1)^2}{2\bar{\sigma}^2}\right],$$

где $\bar{\sigma} = \sigma/\bar{l}$, σ – среднеквадратическое отклонение от среднего, т.е. от \bar{l} .

Влияние относительного среднеквадратичного отклонения $\bar{\sigma}$ на $F_N(L)$ и $F_\Phi(L)$ показано на рис. 2, из которого следует, что при $\bar{\sigma} < 0,1$ $F_N(L)$ и $F_\Phi(L)$ практически эквивалентны, т.е. наночастицы в достаточно точном приближении можно считать монодисперсными.

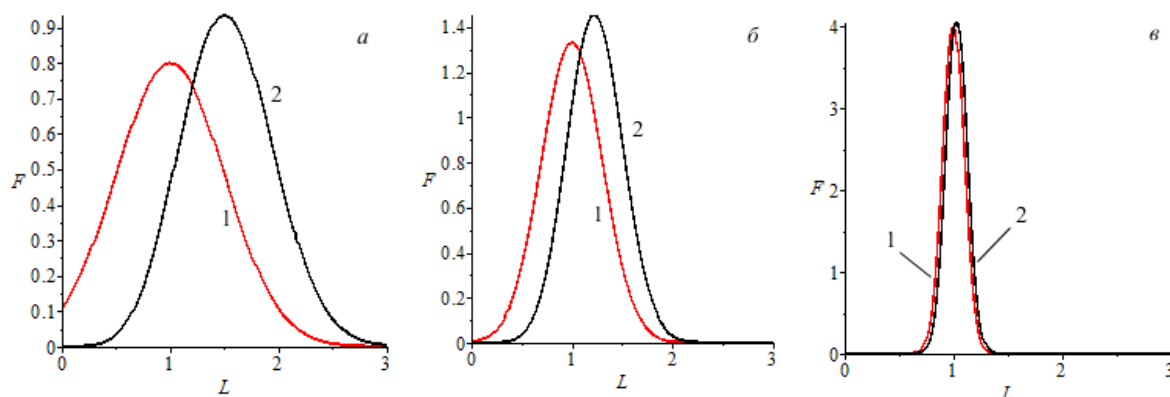


Рис. 2. Влияние степени полидисперсности наночастиц на структуру функций F_N (кривая 1) и F_Φ (кривая 2): а) 0,5; б) 0,3; в) 0,1.

Влияние полидисперсности наночастиц на относительную теплопроводность наножидкостей SiO_2 / терминал-60 и Al_2O_3 /вода (рис. 3, 4) свидетельствует о том, что чем нановзвесь больше отклоняется от монодисперсности, тем ниже теплопроводность наножидкостей при одних и тех же значениях объемной концентрации дисперсной фазы. Это подтверждает тот факт, что для обеспечения повышения теплопроводности наножидкостей необходимо стремиться к нивелированию полидисперсности наночастиц. Полученный результат также может быть одним из объяснений большого разброса значений теплопроводности одинаковых наножидкостей в экспериментах.

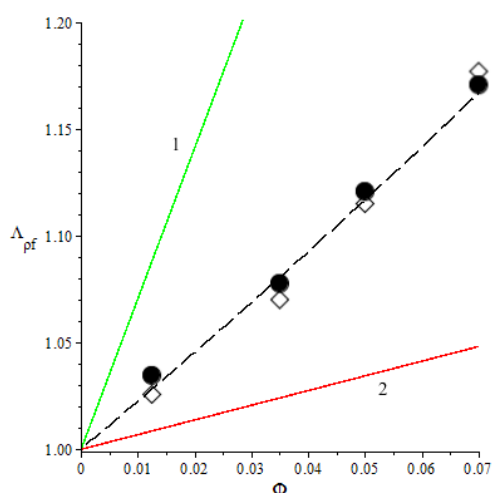


Рис. 3. Сравнение экспериментальных данных с расчетными по относительной теплопроводности наножидкостей SiO_2 / терминал-60 при различных значениях $\bar{\sigma}$: 1 – 0,1; 2 – 0,3 (● – эксперимент; □ – расчет при $\bar{\sigma} = 0,14$; - - - расчет по (5))

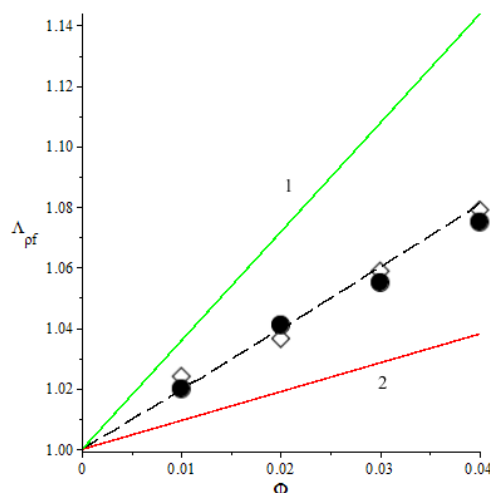


Рис. 4. Сравнение экспериментальных данных с расчетными по относительной теплопроводности наножидкостей Al_2O_3 /вода при различных значениях $\bar{\sigma}$: 1 – 0,1; 2 – 0,3 (● – эксперимент; □ – расчет при $\bar{\sigma} = 0,18$; - - - расчет по (5))

Заключение. Сгенерированный подход на основе функции плотности распределения объемной доли дисперсной фазы по размерам к оценке влияния полидисперсности наночастиц на теплопроводность наножидкостей позволяет по экспериментальным данным идентифицировать степень отклонения размеров наночастиц от среднечисленного размера при их Гауссовском распределении. Аналогичным образом могут быть проанализированы другие теплофизические параметры наножидкостей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Choi, S. U. S. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles / S. U. S. Choi, J. A. Eastman // Int. Mechan. Engineering congress and exhibition. San Francisco. – 1995. – P. 99-105.
2. Использование метода регулярного режима для экспериментального определения теплопроводности жидкости // Ю. В. Шацких, А. В. Костановский, М. Г. Зеодинов, В. А. Милютин // Теплофизика высоких температур. – 2023. – Т.61. – №4. – С. 525-529.
3. Devendiran, D. K. A review on preparation characterization properties and applications of nanofluids / D. K. Devendiran, V. A. Amirtham // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2016. – V.60. – P. 21-40.
4. Magnetic properties of ferromagnetic ultrafine particles prepared by vacuum evaporation on running oil substrate / H. Akoh, Y. Tsukasaki, S. Yatsuya, A. Tasaki // J. Cryst. Growth. – 1978. – V.45. – P. 495-500.
5. Zhu, H. A novel one-step chemical method for preparation of copper nanofluids / H. Zhu, Y. Lin, Y. Yin // J. Colloid and Interface Science. – 2004. – V.277. – P. 100-103.
6. Pak, B. C. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particle / B. C. Pak, Y. I. Cho // Int. J. Exp. Heat Transf. – 1988. – V.11. – P. 151-170.

7. Ultrasound-assisted green synthesis of nanocrystalline ZnO in the ionic liquid [hmin] / E. K. Coharshadi, Y. Ding, M. N. Jorabehi, P. Nancarrow // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2009. – V.16. – P. 120-123.
8. The effect of reaction temperature on the structural and magnetic properties on the structural and magnetic properties of nano CoFe_2O_4 / T. Prabhakaran, R. V. Mangalaraja, J. C. Denardin, J. A. Jimenez // *Ceram. Int.* 2017. – V.43. – P. 5599-5606.
9. Synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles for thermoelectric application / N. K. Devaraj, T. C. Han, P. L. Low [et al.] // *Mater. Res Innov.* – 2014. – V.18. – S. 6-250-S6-353.
10. Das, P. K. A review based on the effect and mechanism of thermal conductivity of normal nanofluids and hybrid nanofluids / P. K. Das // *J. of Molecular Liquids*. – 2017. – V. 240. – P. 420-446.
11. A review of thermal conductivity data, mechanisms and models for nanofluids / J. H. Lee, S. H. Lee, C. Choi [et al.] // *Int. J. Micro-Nano Scale Transp.* – 2010. – V.1 – № 4. – P. 269-322.
12. Wang, B. X. A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles / B. X. Wang, L. P. Zhou, X. F. Peng // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2003. – V. – № 14. – P. 2665-2672.
13. Effect of aggregation and interfacial thermal resistance on thermal conductivity of nanocomposites and colloidal nanofluids / W. Evans, R. Prasher, J. Fish [et al.] // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2008. – V. 51(5-6). – P. 1431-1432.
14. Коузов, П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. – Ленинград: Химия, 1987. – 264 с.
15. Model for heat conduction in nanofluids / D. H. Kumar, H.E. Patel, V. R. Kumar [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* – 2004. – V.93. – №14. – P. 144301.
16. Вдовин, О. В. Сравнительный анализ теоретических моделей определения теплопроводности наножидкости / О. В. Вдовин, Е. Н. Слободина, А. Г. Михайлов // *Омский научный вестник*. – 2024. – Т. 8. – №1. – С. 49-56.
17. Influence of temperature and synthesis time on shape and size distribution of Fe_3O_4 nanoparticles obtained by ageing method / A. G. Muradova, M. P. Zyatseva, A. Z. Sharapaev, E. V. Yurtov // *Colloid Surf.* – 2016. – A509. – P. 229-234.

Поступила в редакцию 15.04.2025 г., рекомендована к печати 05.05.2025 г.

PREDICTION OF THERMAL CONDUCTIVITY OF NANOFLUIDS TAKING INTO ACCOUNT THE POLYDISPERSITY OF NANOPARTICLES

Riazhsikh A.V.

An approach is presented for analyzing the dependence of thermal conductivity of a nanofluid on the polydispersity of nanoparticles using the density function of the volume fraction of the dispersed phase by size, which is explicitly related to the counting function of the distribution of nanoparticles by size. A relation is obtained for calculating the relative thermal conductivity as a function of the volume fraction and the distribution function of nanoparticles by size. Under the assumption that the dispersed phase is distributed according to the Gaussian law, the true relative thermal conductivity of the nanofluid is determined as the average integral value over the range of change in the relative size of nanoparticles. Using the example of processing experimental data on the thermal conductivity of SiO_2 /terminal-60 and Al_2O_3 /water nanofluids, the effect of the degree of polydispersity of nanoparticles on their thermal conductivity is shown. It is found that a decrease in the polydispersity of nanoparticles leads to an increase in the thermal conductivity of nanofluids.

Keywords: nanoparticles, nanofluid, thermal conductivity, polydispersity.

Ряжских Александр Викторович

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и механики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Российская Федерация, г. Воронеж.
Email: riazhsikhav@bk.ru

Riazhsikh Aleksandr Viktorovich

Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics and Mechanics of Voronezh State Technical University, Russian Federation, Voronezh.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ РЕЗКОМ УВЕЛИЧЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ РАБОЧЕГО ТЕЛА

© 2025 *Володин Ю.Г.*

Приводятся результаты экспериментального исследования теплообмена в тонкостенной цилиндрической трубе. Эксперимент показал, что резкое увеличение температуры рабочего тела сопровождается тепловой и гидродинамической нестационарностью с высокими значениями временных производных температуры и скорости потока, что приводит к значительным изменениям коэффициентов теплоотдачи и трения. В высоко динамичном процессе формируется температурный напор, который определяет границы возникающего явления ламинаризации турбулентного пограничного слоя, в результате проявления которого снижается в 2,5 – 3 раза величина коэффициента теплоотдачи.

Ключевые слова: эксперимент, нестационарность, теплоотдача, ламинаризация.

Введение. Нестационарные процессы, происходящие в динамических и тепловых пограничных слоях, вызывали и вызывают интерес не только у исследователей, но и у конструкторов, специалистов по эксплуатации оборудования и других. Нестационарные процессы разделяются на пульсирующие и аperiодические. К последнему случаю относятся, например, пусковые режимы энергосиловых установок, когда топливо подается в камеру сгорания и воспламеняется. Если в качестве примера рассматривать газотурбинный двигатель (ГТД), то с подачи топлива и его возгорания начинается работа двигателя. За короткий промежуток времени в камере сгорания изменяются параметры рабочего тела – плотность и вязкость, формируется и развивается тепловой пограничный слой. Динамический пограничный слой испытывает на себе соответствующие воздействия в связи с изменением тепловой обстановки. Нестационарные процессы широко представлены в литературных источниках, однако, практически отсутствует информация о тепловых высоко динамичных процессах.

Экспериментальный стенд. Для изучения теплообменных и газодинамических процессов был разработан и изготовлен экспериментальный стенд. Основой стенда является разомкнутый газодинамический контур, в котором в качестве генератора тепла используется плазмотрон 1 (рис. 1). Плазмотрон позволяет за очень короткий промежуток времени достичь высоких степеней нагрева рабочего тела. Для чистоты эксперимента необходимо на входе в экспериментальный канал сформировать равномерные профили скорости и температуры. Это достигается путём пристыковки к плазмотрону форкамеры 2 с соплом, спрофилированным по кривой Витошинского [1]. Внутри форкамеры установлены выравнивающие решётки 3 [2], а перед ними просверлены двенадцать радиальных отверстий, через которые подается воздух минуя плазмотрон, что позволяет варьировать величиной температуры рабочего тела и скоростью её нарастания. К выходу сопла крепится экспериментальный канал 4, состоящий из семи секций диаметром и длиной 45 мм с толщиной стенки 0,08 мм, изготовленных из нержавеющей стали. Воздух, подаваемый в плазмотрон, поступал из ресивера, в который закачивался компрессором, и проходил через фильтры грубой 12 и тонкой 13 очистки и запорно-регулирующую арматуру 10 и 11.

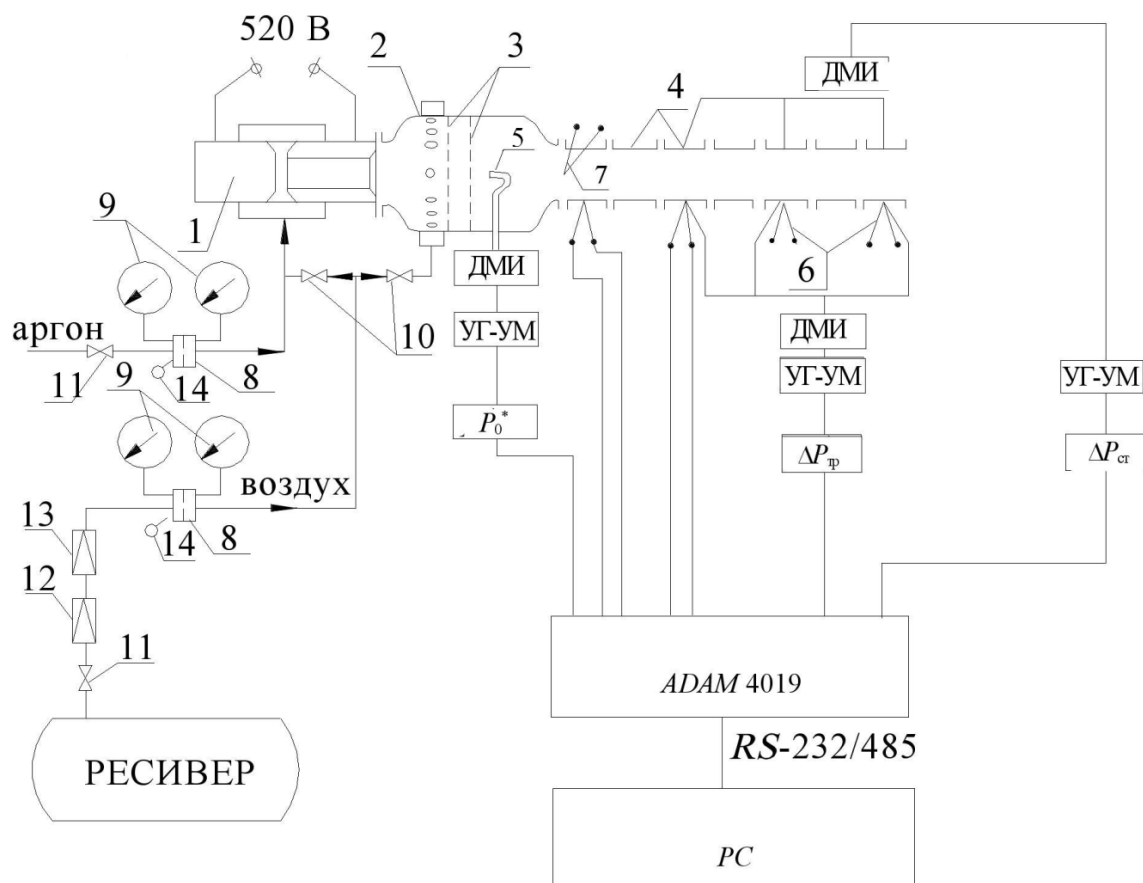


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда

В состав измерительно-регистрающей системы входили первичные преобразователи, согласующие устройства и регистратор. Расход рабочего тела (воздуха) измерялся расходомером 8 переменного перепада давления, который не входил в измерительно-регистрающую систему. Давления до и после диафрагмы измерялись образцовыми манометрами 9, а температура газа стеклянным термометром 14. Температуры потока и стенок стенок канала 4 измерялись микротермопарами [3, 4] с диаметром термоэлектродных проводов 65 микронов, давления – индуктивными датчиками давления ДМИ-0,1-2 в комплекте с приборами УГ-УМ. Хромель-алюмелевой термопарой 7 измерялась температура рабочего тела на входе в экспериментальный канал 4. Хромель-копелевыми термопарами 6 измерялась температура стенки канала в функции продольной координаты и времени. Концы термоэлектродных проводов, раскатанные до 20 микронов, приваривались к наружной поверхности канала в середине 1-ой, 3-ей, 5-ой и 7-ой секций канала. Измерение полного давления проводилось в форкамере трубкой полного напора в форме «лебединой шеи» [5]. Касательные напряжения трения изменялись методом «трубка-выступ» [6, 7].

Результаты исследований. Экспериментальные исследования проведены в интервале среднерасходного числа Рейнольдса от 30000 до 60000. При этом температура рабочего тела в приосевой области изменялась в диапазоне $T = 293 - 1500$ К с динамикой увеличения температуры потока до 12000 К/с и скорости потока до 700 м/с^2 (рис. 2). Были посчитаны среднеквадратичные погрешности [8], величины которых не превысили значений при определении температуры 0,75 %, скорости потока 1,6%, коэффициентов трения и теплоотдачи соответственно 9,2% и 9,5%.

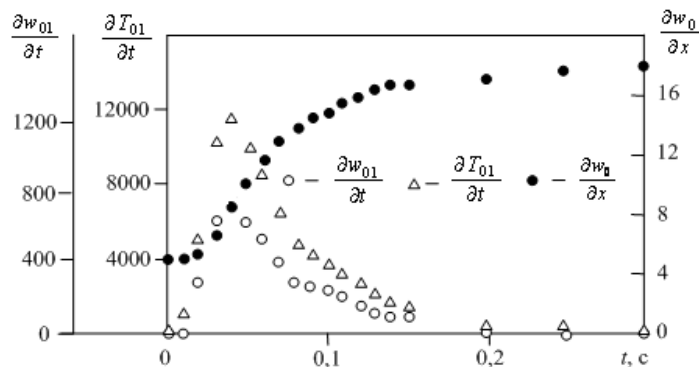


Рис. 2. Изменения во времени величин производных скорости и температуры потока

Значительные изменения температуры потока приводят к соответствующему изменению плотности и вязкости рабочего тела. Здесь с возрастанием температуры плотность рабочего тела уменьшается, а вязкость увеличивается, что приводит к увеличению скорости потока более чем в три раза при постоянстве его массового расхода из условий эксперимента.

С достижением максимальных значений ускорения по температуре и по скорости потока на временной отметке 0,04 секунды температурный фактор $\psi_h = T_w / T_0$ уменьшается по величине до значения 0,25. В том случае, когда во времени изменяются величины температуры и скорости потока, процесс по характеру будет нестационарным. Его временная продолжительность составляет примерно 0,1 секунды. Далее временные производные стремятся к нулевому значению и процесс течения и теплоотдачи принимает стационарный характер.

В [9] показано, что уменьшение величины числа Рейнольдса приводит к более интенсивному воздействию нестационарности на параметры течения и теплообмена, а тепловая и гидродинамическая нестационарности оказывают взаимно противоположное влияние на коэффициент теплоотдачи. Коэффициент теплоотдачи в виде критерия Стантона St определялся по выражению:

$$St = \frac{q_w}{\rho_o w_o (h_o^* - h_w)}. \quad (1)$$

В числителе выражения (1) находится плотность теплового потока, определяемая по выражению:

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

Первое слагаемое этого выражения представляет собой произведение: удельной теплоемкости, плотности, толщины стенки канала и производной температуры стенки канала по времени. Второе слагаемое – это потери тепла посредством свободной конвекции и лучеиспускательной способностью неизолированной поверхности канала. Такие потери [10] составили величину менее 5 % от q_w . Температура (рис. 3) стенки канала увеличивается практически по наклонной прямой, поэтому экспериментальные точки, представляющие временную производную температуры стенки канала, выстроились в виде горизонтальной прямой параллельной оси абсцисс, т.е. производная имеет постоянную величину. Следовательно, плотность теплового потока (выражение (2)) будет тоже постоянной величиной.

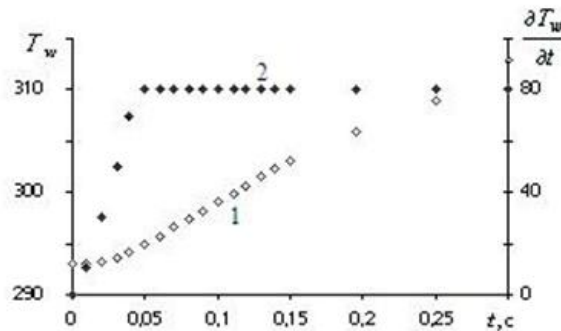


Рис. 3. Изменения во времени величин $T_w(1)$, $\frac{\partial T_w}{\partial t}$ (2)

В знаменателе выражения (1) есть два сомножителя: первый – это массовая скорость, которая по условиям эксперимента имеет постоянную величину, а второй в скобках – разность энтальпий, которая является единственной переменной величиной при определении коэффициента теплоотдачи St . В процессе проведения экспериментальных исследований, эта величина изменялась в некотором диапазоне, что позволило определить следующее. На рисунке 4 построен график зависимости коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса. После включения плазматрона и резкого увеличения температуры рабочего тела величина коэффициента теплоотдачи принимает максимальные значения и затем уменьшается с уменьшением величины числа Рейнольдса, а экспериментальные точки выстраиваются вдоль лучей 3, пересекая прямую 1 (стандартный закон теплоотдачи для турбулентных режимов течения) группируясь около прямой 2 (стандартный закон теплоотдачи для ламинарных режимов течения). Среднерасходное число Рейнольдса уменьшается от величины 51600 до величины 18800, т.е. в 2,75 раза и указывает на то, что режим течения турбулентный. Сложившаяся на рисунке 4 ситуация позволяет констатировать факт формирования явления ламинаризации турбулентного пограничного слоя (ТПС).

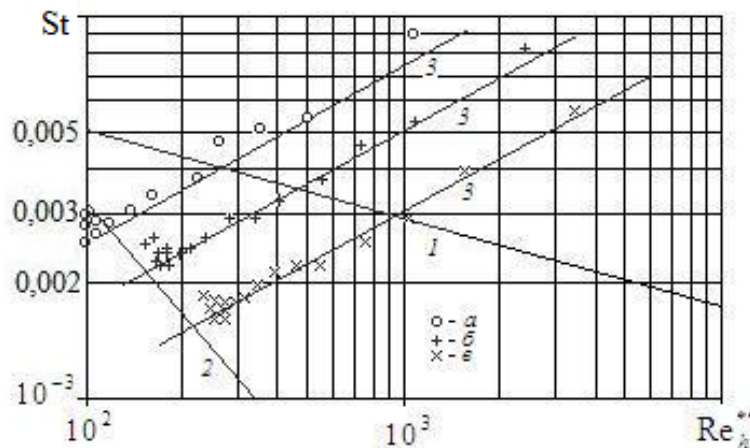


Рис. 4. Зависимость величины коэффициента теплоотдачи St от числа Рейнольдса Re_h^{**} .
 Прямая 1 – $St = \frac{0,0128}{Re_h^{**0,25} Pr^{0,75}}$, прямая 2 – $St = \frac{0,22}{Re_h^{**} Pr^{4/3}}$, прямая 3 – аппроксимационная зависимость

$$St = St_0 \frac{1}{w_0^2} \frac{\partial w_0}{\partial t} \sqrt{\frac{1}{Re_h^{**}} \frac{1}{\Delta h} \frac{d(\Delta h)}{\partial t}}, \text{ а } a - X = 2,5, \text{ б } - X = 4,5, \text{ в } - X = 6,5$$

Анализ литературных источников показал, что полученные результаты коррелируются с результатами исследований других авторов по следующим параметрам: характер и направление изменения всех чисел Re_{01} , Re^{**} , Re_n^{**} , коэффициентов C_f и St , диапазон изменения характерного числа $Re^{**} \sim 1000 \div 400$, величина положительного градиента скорости.

При выполнении эксперимента время работы плазмотрона составило 0,5 с. Полученные результаты вызвали интерес к продлению времени работы плазмотрона до 2-х и 3-х секунд с целью большего прогрева рабочего тела и обтекаемой поверхности канала. Результаты оказались аналогичны результатам, приведенным на рис. 4 только с большим количеством экспериментальных точек. Увеличение максимальной температуры прогрева рабочего тела в приосевой области также не привело к каким-либо изменениям результатов эксперимента. Регистрация информации при снижении температуры рабочего тела после выключения плазмотрона показала, что экспериментальные точки мигрируют в обратном направлении от прямой 2 к прямой 1 параллельно прямой 3.

Рассмотрение полученных результатов по изменению температур рабочего тела и стенки канала во времени показало следующее: сформировавшаяся ламинаризация ТПС происходит при температурном напоре (разность между температурой газа в приосевой области и температурой стенки канала) более 700 градусов, а область температур от 400 до 700 градусов – переходная зона. Ламинаризация ТПС при тепловом потоке, направленном от газа к стенке канала, зафиксирована впервые.

В динамическом пограничном слое складывается следующая картина. С динамичным нарастанием температуры газового потока и изменением величин плотности и вязкости рабочего тела скорость потока увеличивается более чем в 2,5 раза с ускорением 700 м/с^2 при постоянстве массового расхода, что формирует гидродинамическую нестационарность. Коэффициент трения C_f увеличивается в 2,5 – 3 раза под влиянием этой нестационарности, принимая максимальные значения на временной отметке, соответствующей максимальным значениям всех производных величин по времени. Достигнув максимума, величина C_f монотонно уменьшается. Здесь нестационарный процесс занял 0,15 сек. За пределами этого временного интервала и учёта влияния неизотермичности экспериментальные точки группируются около прямой, представляющей собой стандартный закон трения для турбулентных режимов течения. Такой факт позволяет констатировать отсутствие влияния каких-либо дестабилизирующих факторов на динамический пограничный слой. В данном временном интервале 0 – 0,15 секунд влияние неизотермичности оценивалось не более 5 % при минимальной величине энтальпийного фактора 0,25.

По результатам выполненного анализа уместно вспомнить о результатах, приведенных в работе [11], в которой тепловой поток был направлен от нагреваемой стенки канала в газовый поток, а энтальпийный фактор был равен величине 4,4 и имела место ламинаризация ТПС. Тогда получается, что ламинаризация ТПС происходит при высоких степенях нагрева обтекаемой стенки канала или газового потока и не зависит от направления теплового потока.

Выводы. Эффект ламинаризации теплового ТПС получен впервые при резком увеличении температуры рабочего тела при тепловом потоке, направленном от потока к обтекаемой стенке канала. Причиной ламинаризации ТПС в рассмотренной ситуации является температурный напор, который определяет границы переходной зоны от 400 и до 700 градусов и границу области ламинаризации ТПС $\Delta T \geq 700 \text{ К}$.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бошняк, Л. Л. Измерения при теплотехнических исследованиях / Л. Л. Бошняк. – М.: Машиностроение, 1974. – 447 с.
2. Повх И. Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении / И. Л. Повх. – Л.: Машиностроение, Ленинград. отделение, 1974. – 479 с.
3. Исследование тепловой инерционности микротермопар / Ю. Г. Володин, И. Ф. Закиров, К. С. Федоров, М. В. Яковлев // Датчики и системы. – 2007. – № 6. – С. 33-35. – EDN KWGNPN.
4. Ярышев, Н. А. Теоретические основы измерения нестационарных температур / Н. А. Ярышев. – Л. "Энергия", 1990. – 256 с.
5. Петунин, А. Н. Измерение параметров газового потока / А. Н. Петунин. – М.: Машиностроение, 1974. – 260 с.
6. Измерение касательных напряжений трения в нестационарном газовом потоке / Ю. Г. Володин, О. П. Марфина, А. Н. Богданов [и др.] // Датчики и системы. – 2009. – № 2. – С. 34-36. – EDN JWYAOF.
7. Репик, Е. У. Исследование нового метода опытного определения поверхностного трения в турбулентном пограничном слое / Е. У. Репик, Б. К. Кузнецов // Инженерно-физический журнал. – 1980. – Т. 38. – № 2. – С. 197-200.
8. Володин, Ю. Г. Об определении погрешностей в нестационарном теплофизическом эксперименте / Ю. Г. Володин. – Казань, 1986. – 7 С.
9. Володин, Ю. Г. Математическое моделирование пусковых режимов энергетических установок / Ю. Г. Володин, О. П. Марфина. – СПб.: «Инфо-да», 2007. – 128 с.
10. Михеев, М. А. Основы теплопередачи: учебник / М. А. Михеев. – М-Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 392 с.
11. Кун, К. В. Переход от турбулентного режима к ламинарному для течения в трубе со значительным изменением физических свойств / К. В. Кун, Х. К. Перкинс // Теплопередача. Сер. С. – 1970. – Т. 92. – № 3. – С. 198.

Поступила в редакцию 28.04.2025 г., рекомендована к печати 15.05.2025 г.

EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER WITH A SHARP INCREASE IN THE TEMPERATURE OF THE WORKING FLUID

Volodin I.U.G.

The article presents the results of an experimental study of heat transfer in a thin-walled cylindrical pipe. The experiment showed that a sharp increase in the temperature of the working fluid is accompanied by thermal and hydrodynamic instability with high values of the time derivatives of temperature and flow velocity, which leads to significant changes in the coefficients of heat transfer and friction. In a highly dynamic process, a temperature pressure is formed, which determines the boundaries of the emerging phenomenon of laminarization of the turbulent boundary layer, as a result of the manifestation of which the value of the heat transfer coefficient decreases by 2.5 - 3 times.

Keywords: experiment, nonstationarity, heat transfer, laminarization.

Володин Юрий Гурьянович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электромеханических объектов водного транспорта Института морского и речного флота имени Героя Советского Союза М.П. Девятаева – Казанского филиала ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань.
E-mail: yu.g.volodin@mail.ru

Volodin Iurii Gurianovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electromechanical Water Transport Facilities of Institute of Maritime and Inland Shipping named after Hero of the Soviet Union M.P. Devyataev - Kazan Branch «Volga State University of Water Transport», Russian Federation, Republic of Tatarstan, Kazan.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ПОГРУЖНОГО ТЕПЛООБМЕННОГО ЭЛЕМЕНТА С КОЛЬЦЕВЫМИ ТРУБКАМИ ДЛЯ АППАРАТА С ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ

© 2025 *Надеев А.А., Кожухов Н.Н., Прутских Д.А., Дубанин В.Ю.*

В работе представлены результаты численного моделирования погружного теплообменного элемента с кольцевыми трубками для цилиндрических аппаратов с перемещающимся псевдоожиженным слоем. Рассмотрен новый вариант конструкции теплообменного элемента. Составлена и проверена на адекватность математическая модель его работы. В результате вычислительного эксперимента получены гидравлические характеристики для конкретного диапазона расходов теплоносителей, выполнен анализ зон с минимальной и максимальной скоростями. Произведена оценка влияния частичного изменения конструкции на гидродинамику элемента.

Ключевые слова: псевдоожижение, погружной элемент, гидравлическая характеристика, кольцевые трубки, движущийся слой.

Введение. Псевдоожижение широко применяется при организации различных технологических процессов в дисперсных системах. К его достоинствам относится высокая интенсивность процессов тепло- и массообмена, выравнивание полей температур и концентраций внутри слоя материала. Однако, именно теплообмен является ограничивающим фактором псевдоожиженной дисперсной системы [1]. Для повышения степени интенсификации теплообмена при псевдоожижении применяются различные теплообменные элементы, полностью или частично помещённые в псевдоожиженный слой дисперсного материала, и называемые погружными поверхностями. Зачастую они представлены одиночными трубками или пучками горизонтальных либо вертикальных труб с транспортируемым по ним теплоносителем [1]. Развитие промышленности привело к многообразию конструкций подобных устройств, закрывающих основные потребности технологических процессов [2]. В то же время для цилиндрических конструкций аппаратов с перемещающимся псевдоожиженным слоем интенсификация теплообмена за счёт погружных поверхностей исследована мало. В работе предлагается новая конструкция поверхности, позволяющая повысить интенсивность теплообмена. Для ее оценки необходимы гидравлические характеристики, которые можно определить с использованием численного моделирования.

Описание конструкции теплообменного элемента и постановка задачи. Основным элементом аппаратов с направленно перемещающимся псевдоожиженным слоем является рабочая камера, в которой протекает теплотехнологический процесс. Для перемещения материала в рабочей камере её внешним корпусом и внутренней обечайкой формируется кольцевой канал [3]. Таким образом, теплообменный элемент должен иметь кольцевую форму. Кроме того, для использования всей поверхности теплообмена он должен быть полностью погружён в псевдоожиженный слой [1].

Одним из требований, предъявляемых к теплообменникам, погружённым в псевдоожиженный слой является обеспечение равномерного нагрева дисперсного материала, поэтому конструкция теплообменного элемента должна обеспечивать равномерное распределение теплоносителя в трубах и, следовательно, температуры теплоносителя по сечению рабочей камеры аппарата.

На рис. 1 приведён общий вид конструкции предлагаемого теплообменного элемента с выделенными входным и выходным коллекторами.

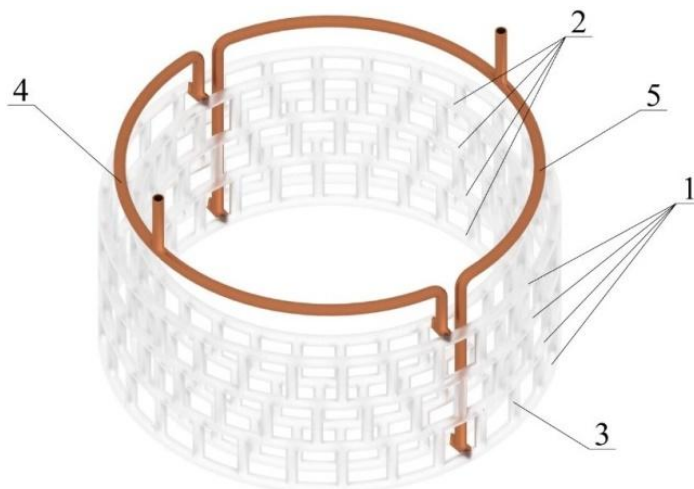


Рис. 1. Модель теплообменного элемента:

1 – внешние кольцевые трубки; 2 – внутренние кольцевые трубки; 3 – переточная трубка;
4 – выходная трубка-коллектор; 5 – входная трубка-коллектор

Теплообменный элемент состоит из восьми кольцевых трубок, расположенных в четыре горизонтальных ряда. Каждый ряд включает две трубки разного кольцевого диаметра, которые называются внешней 1 и внутренней 2 трубкой. Трубки теплообменного элемента могут быть выполнены из различных материалов требуемой теплопроводности. Одна внешняя и одна внутренняя кольцевые трубки образуют пару и располагаются концентрически в одной горизонтальной плоскости. Как внешние, так и внутренние кольцевые трубки соединены между собой одинаковым количеством вертикальных переточных трубок 3, расположенных в шахматном порядке. Их количество составляет 28 шт., общее число – 168 шт.

Для подачи и отвода теплоносителя предусмотрены входная 5 и выходная 4 полукольцевые трубки-коллекторы, расположенные в верхней части теплообменного элемента. При этом входная трубка-коллектор соединена с нижней парой кольцевых трубок в двух противоположных точках с использованием вертикальных трубок, расположенных между парами кольцевых трубок. Аналогично выходная трубка-коллектор соединена с верхней парой кольцевых трубок.

Теплообменный элемент работает следующим образом. Теплоноситель через входную трубку-коллектор 5 подаётся в нижнюю пару кольцевых трубок 1 и 2. Через переточные трубки 3 теплоноситель поступает в вышерасположенные пары кольцевых трубок 1 и 2. Отвод теплоносителя осуществляется через выходную полукольцевую трубку-коллектор 4. Теплообменный элемент, за исключением полукольцевых трубок-коллекторов, погружён в псевдоожиженный слой. Теплоноситель, проходящий через теплообменный элемент и имеющий большую температуру чем оживающий агент, передает тепловую энергию псевдоожиженному слою, что позволяет интенсифицировать различные теплотехнологические процессы, при этом переточные трубки позволяют обеспечить требуемую структуру и равномерность течения теплоносителя.

Основное назначение вертикальных переточных трубок, соединяющих кольцевые трубки, состоит в выравнивании распределения теплоносителя по сечению аппарата, в котором он применяется.

При этом применение таких трубок приводит к значительному усложнению структуры течения жидкости в различных частях теплообменного элемента, что в свою очередь может приводить к образованию застойных зон с низкой или даже нулевой скоростью потока, смене режимов течения а, следовательно – к ухудшению распределения температуры жидкости и сложности проектирования подобных систем. Для оценки картины течения и значений скоростей на интересующих участках теплообменного элемента воспользуемся широким набором инструментов постобработки результатов численного моделирования.

Численное моделирование течения теплоносителя в теплообменном элементе.

Для моделирования течения теплоносителя в теплообменном элементе использовался один из пакетов численного моделирования среди распространённых как в нашей стране, так и в остальных ведущих странах мира [4]. Для описания гидродинамики использовалась система уравнений (1) - (5):

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F};$$

$$\nabla \cdot (\rho\mathbf{u}) = 0;$$

$$\mathbf{K} = (\mu + \mu_T)(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T);$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho\varepsilon;$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k},$$

где $\varepsilon = \rho\nu$; $\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$; $P_k = \mu_T \left[\nabla \bar{\mathbf{u}} : (\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T) \right]$; μ – коэффициент динамической вязкости; μ_T – вихревая (турбулентная) вязкость; ρ – плотность; \mathbf{u} – вектор скорости; k – турбулентная кинетическая энергия; ε – скорость турбулентной диссипации; U и L – масштабы скорости и длины соответственно; C_μ , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k , σ_ε – эмпирические коэффициенты; \mathbf{K} – тензор вязких напряжений; P_k – генерация турбулентной кинетической энергии.

Данная система уравнений описывает двухпараметрическую модель турбулентности, наиболее часто применяемую при решении подобных задач [5].

При решении задачи приведённая система решалась при следующих условиях:

- на входе скорость составляет u_0 , определяемой из уравнения неразрывности, вектор которой направлен по нормали к соответствующей границе;
- на выходе задавалась величина избыточного давления, составляющая 0 Па;
- на стенках – условия прилипания;
- турбулентная интенсивность при этом составляла $I_T = 0,05$, а масштаб турбулентности определялся геометрией модели.

Ниже приведены уравнения, соответствующие принятым условиям:

- на входе:

$$\mathbf{u} = -U_0 \mathbf{n}; U_{ref} = U_0; k = \frac{3}{2} (U_{ref} I_T)^2; \varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{L_T};$$

- на выходе:

$$[-p\mathbf{I} + \mathbf{K}]\mathbf{n} = -\hat{p}_0 \mathbf{n}.$$

При этом:

$$\hat{p}_0 \leq p_0, \nabla \mathbf{k} \cdot \mathbf{n} = 0, \nabla \varepsilon \cdot \mathbf{n} = 0.$$

Транспортируемым теплоносителем для расчёта была принята вода при температуре 20 °С. На входе в теплообменный элемент был задан расход теплоносителя. Количество элементов, полученных в результате построения расчётной сетки, оказалось равным 5311049. Исследованы 5 режимов работы теплообменного элемента, отличающихся расходами теплоносителя, а именно от 0,03 до 0,3 кг/с. Эквивалентная шероховатость трубы составляла 0,1 мм.

Для получения результатов построены вспомогательные линии, поверхности и объёмы, для которых рассчитаны значения интересующих гидравлических характеристик. Так, например, для определения скорости на центральной линии внешней нижней кольцевой трубки использовалось параметрическое задание этой линии:

$$x = \frac{355}{2} \cos(s), y = \frac{355}{2} \sin(s),$$

$$\text{где } s = -\frac{\pi}{4} \dots \left(2\pi - \frac{\pi}{4}\right).$$

Обработка полученных результатов позволила получить распределение скорости в трубках теплообменного элемента и определить потери давления теплоносителя.

На рис. 2 приведена зависимость потерь давления воды Δp , кПа при его прохождении через теплообменный элемент от расхода воды G , кг/с. Величина потерь давления определялась разницей между значением давления на входе в элемент и на выходе из него. Из рис. 2 видно, что с увеличением расхода происходит экспоненциальное увеличение потерь давления. Полученная характеристика позволит выбирать режим работы аппаратов с псевдооживленным слоем с известными значениями затрат на прокачку теплоносителя и количеством тепловой энергии, передаваемым элементом псевдооживленному слою.

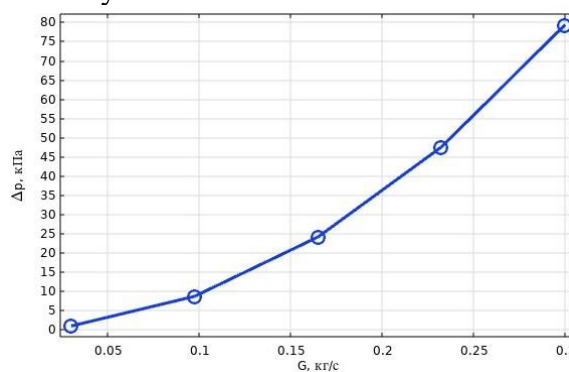


Рис. 2. Зависимость потерь давления от расхода воды

На рис. 3 приведено распределение скорости воды u , м/с по осям внешних кольцевых трубок теплообменного элемента при расходе воды 0,03 кг/с, а на рис. 4 – при расходе 0,3 кг/с. Здесь по оси абсцисс отложена длина осей трубок $l_{тр}$, мм. Нумерация кольцевых трубок начинается с нижней части теплообменного элемента, т.е. нижняя кольцевая трубка считается первой.

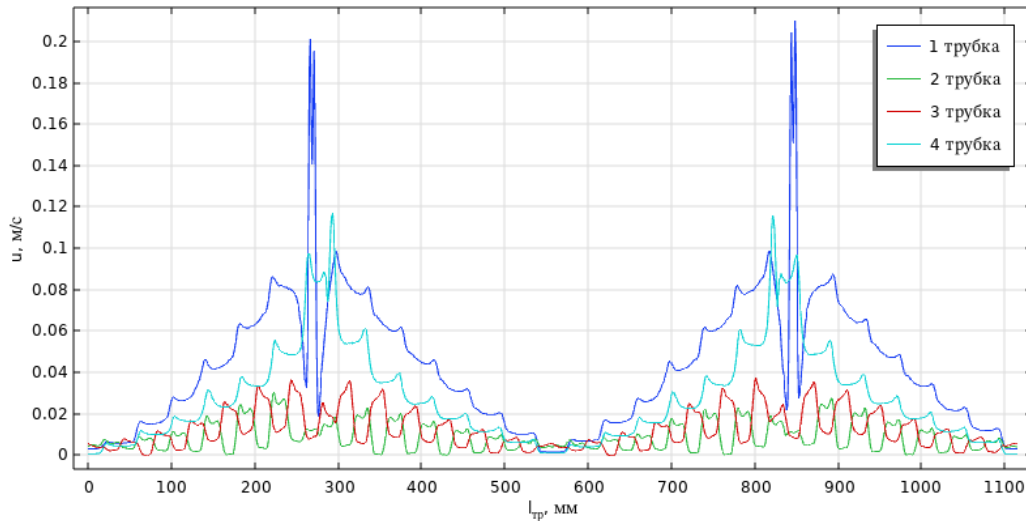


Рис. 3. Распределение скорости воды по осям внешних кольцевых трубок при $G = 0,03$ кг/с

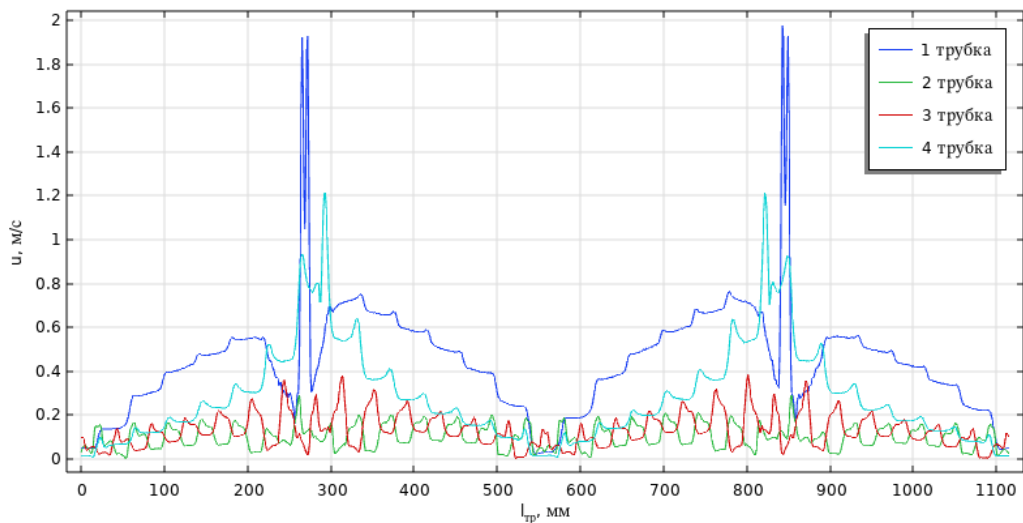


Рис. 4. Распределение скорости воды по осям внешних кольцевых трубок при $G = 0,3$ кг/с

Из рис. 3 и рис. 4 видно, что скорость воды принимает максимальные значения у трубки 1, где наблюдаются четыре экстремума скорости. На рис. 5а представлен график скорости теплоносителя, соответствующей участку оси (рис. 5б). На данном участке имеется два максимума. Из рис. 5а видно, что минимум скорости (на центре рассматриваемой оси) соответствует вводу воды из входной трубки-коллектора в кольцевую трубку. Два максимума скорости принадлежат точкам оси трубки, расположенным посередине участка ($l_{тр} = 14$ мм) между осью подводящей трубки-коллектора и осью вертикальной переточной трубки. Минимальные значения скорости воды наблюдаются в точках осей вертикальных переточных трубок, где часть воды транспортируется в следующие вышерасположенные трубки ($l_{тр} = 0$ мм и $l_{тр} = 20$ мм).

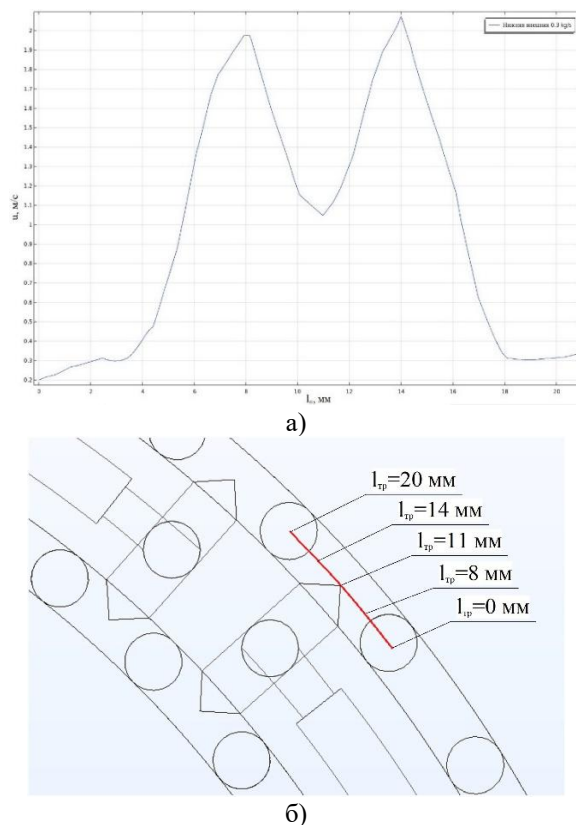


Рис. 5. Распределение скорости воды на участке внешней кольцевой трубки 1 при $G = 0,3$ кг/с

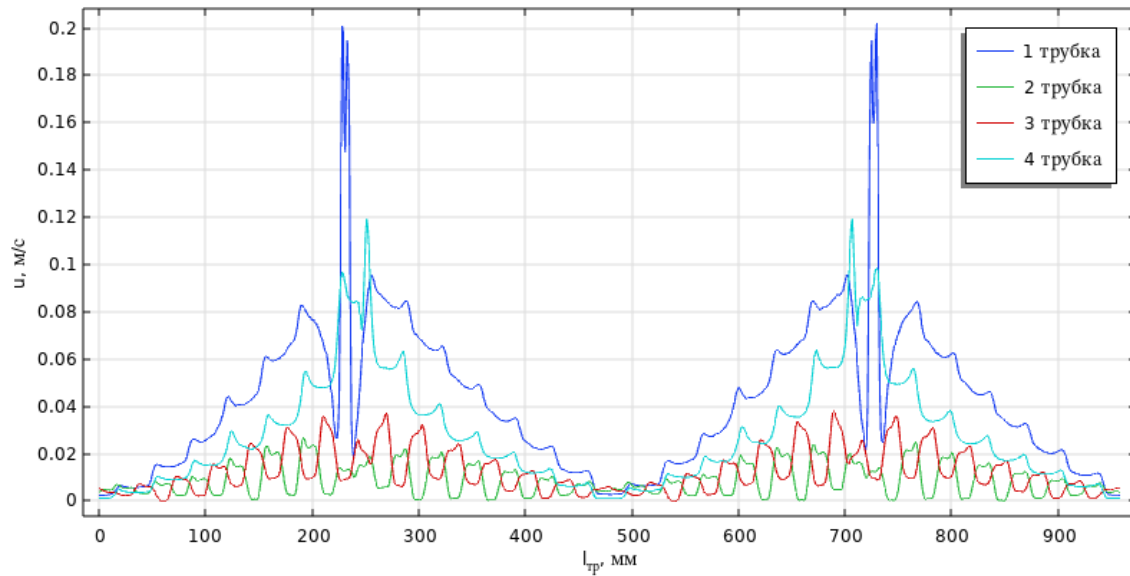
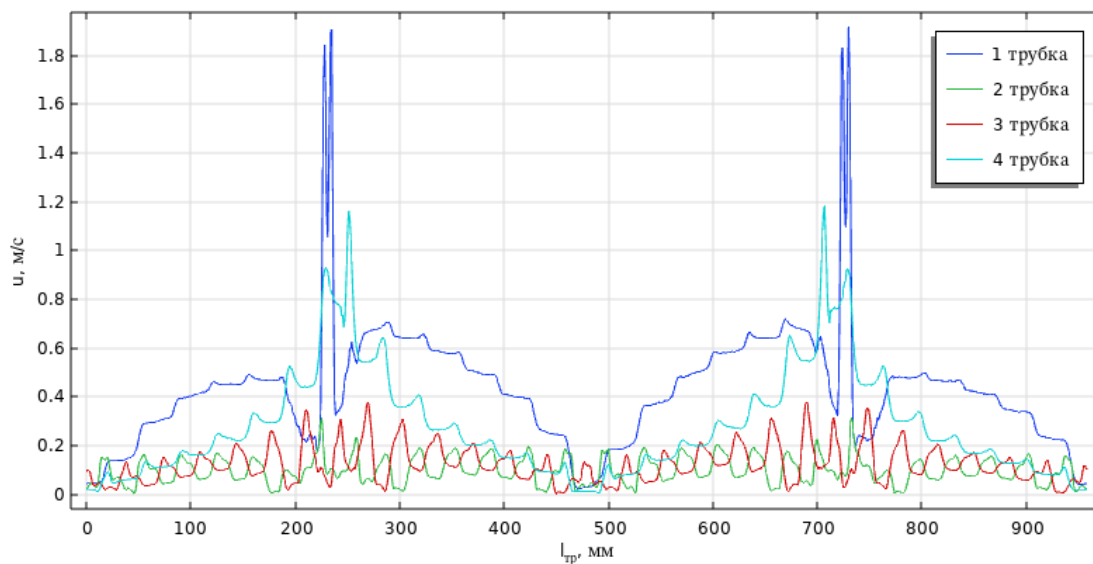
Средние значения максимумов скоростей на этих участках (рис. 3, 4): $u = 0,205$ м/с при $G = 0,03$ кг/с; $u = 1,95$ м/с при $G = 0,3$ кг/с. Средние значения минимума скорости на вводе $u = 0,145$ м/с при $G = 0,03$ кг/с; $u = 1,12$ м/с при $G = 0,3$ кг/с.

Максимальные значения скорости у четвертой трубки также соответствуют участкам кольцевой трубки, расположенным рядом с выводом воды в выходную трубку-коллектор ($u = 0,115$ м/с при $G = 0,03$ кг/с; $u = 1,2$ м/с при $G = 0,3$ кг/с). Расположенный между ними минимум скорости соответствует этому выводу ($u = 0,09$ м/с при $G = 0,03$ кг/с; $u = 0,8$ м/с при $G = 0,3$ кг/с).

Минимальные значения скорости воды ($u = 0,02$ м/с) наблюдаются на всех кольцевых трубках на двух участках, равноудалённых от входных (выходных) вертикальных трубок коллектора. На рис. 3 и 4 они соответствуют $l_{тр} = 550$ мм и двум значениям при $l_{тр} = 0$ мм $l_{тр} = 1120$ мм. Локальные максимумы скорости на всех кривых соответствуют поступлению воды в переточные трубки.

Из рис. 3-5 можно сделать вывод, что для всех трубок скорость воды принимает локальные максимальные значения на середине каждого участка кольцевой трубы, расположенного между соседними вертикальными переточными трубками.

На рис. 6 приведено распределение скорости воды u , м/с по осям внутренних кольцевых трубок теплообменного элемента при расходе воды 0,03 кг/с, а на рис. 7 – при расходе 0,3 кг/с. Здесь видно, что распределение скоростей во внутренних трубках практически идентично внешним трубкам, включая абсолютные значения скоростей. Отличие заключается только в меньшей длине внутренних трубок, что с учётом аналогичного количества переточных трубок, означает более близкое расположение максимумов скоростей на графиках.

Рис. 6. Распределение скорости воды по осям внутренних кольцевых трубок при $G = 0,03$ кг/сРис. 7. Распределение скорости воды по осям внутренних кольцевых трубок при $G = 0,3$ кг/с

Моделирование течения воды в элементе позволило получить также графики скорости по осям переточных трубок. На рис. 8 приведены такие графики для семи переточных трубок, соединяющих первую и вторую внешние кольцевые трубки, причём эти трубки расположены в одном из четырёх секторов теплообменного элемента. Таким образом, переточная трубка 11 – это одна из трубок, находящихся рядом с вводом воды из трубки-коллектора, а трубка 5 является самой удалённой от ввода.

Изменение скорости в переточных трубках при расходе воды 0,3 кг/с представлено на рис. 8 (части графиков между двумя штриховыми линиями). Максимальные значения скорости наблюдаются на входе в каждую переточную трубку, причём, чем ближе переточная трубка к месту ввода воды, тем больше эта скорость ($u_{\max} = 1,14$ м/с у трубки 11; $u_{\max} = 0,3$ м/с у трубки 5). Минимальные значения скоростей ($u_{\min} = 0,01$ м/с) наблюдаются у промежуточных трубок 6-10. Трубка 5 имеет наименьшую разницу ($u_{\max} - u_{\min}$).

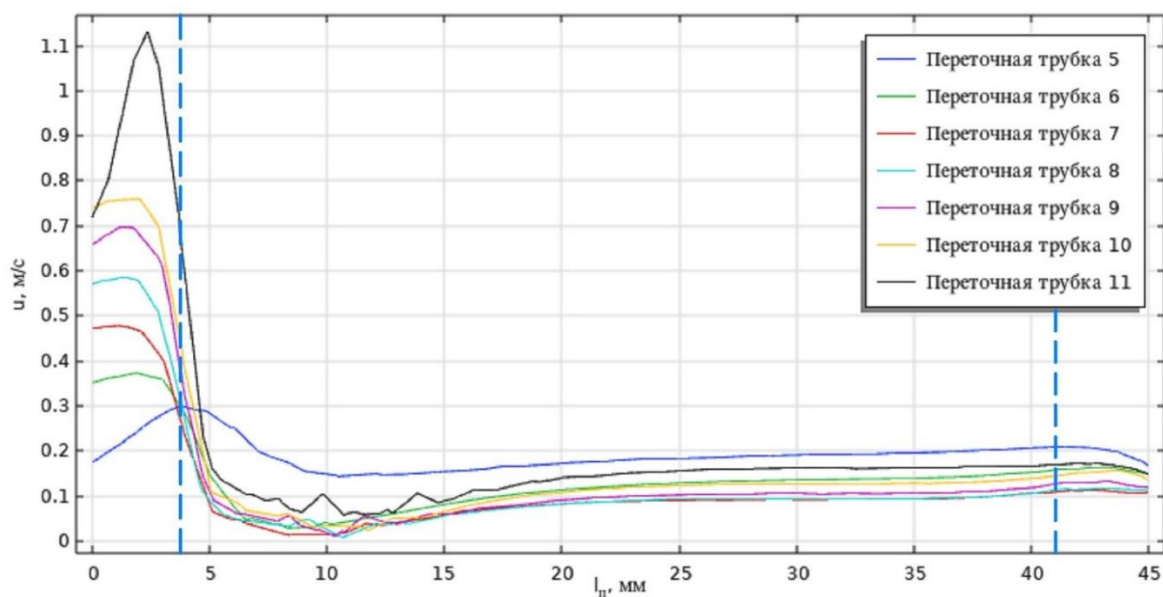


Рис. 8. Распределение скорости воды по осям переточных трубок одного сектора при $G = 0,3$ кг/с

После прохождения зоны поворота потока, с $l_p = 10$ мм наблюдается постепенное выравнивание скорости в каждой трубке, скорость составляет от 0,1 до 0,2 м/с, причём минимальные значения скорости имеют три средние трубки (7, 8, 9). Затем на входе во вторую кольцевую трубку происходит незначительное снижение скорости у некоторых трубок. Аналогичные процессы наблюдаются у переточных трубок из трёх других секторов, а также у переточных трубок, расположенных между второй, третьей и четвёртой кольцевыми трубками.

Анализ рис. 8 позволяет сделать вывод, что поток воды проходит через каждую переточную трубку, т.е. застойных зон нет. Абсолютные значения скорости воды по осям переточных трубок имеют один порядок. Наиболее сглаженный вид с минимальной разницей ($u_{\max} - u_{\min}$) имеют четыре трубки, наиболее удалённые от ввода воды. Минимальные значения скорости при установившемся течении имеют трубки, расположенные в центре каждого сектора.

Выводы. Результаты численного исследования показывают, что рассматриваемый вариант конструкции погружного теплообменного элемента имеет гидравлическое сопротивление, экспоненциально зависящее от расхода теплоносителя. Полученная гидравлическая характеристика позволит производить выбор оптимального режима работы элемента, зависящего от затрат на прокачку теплоносителя и количества тепловой энергии, которое необходимо передать дисперсному материалу.

Анализ данных по скорости воды показывает, что максимальные значения скорости в кольцевых трубках наблюдаются на участках, расположенных у ввода воды из входных трубок-коллекторов (и вывода воды в выходные трубки-коллекторы), а минимальные — на участках, равноудалённых от вводов воды. Таким образом, равноудалённые участки являются застойной зоной у трубок 1 и 3. Данные застойные зоны, с учётом шахматного расположения переточных трубок, исключить невозможно.

Переточные трубки не имеют застойных зон, значения скорости воды на осях трубок при установившемся течении являются одного порядка и находятся в диапазоне 0,08–0,28 м/с для всех 168 переточных трубок теплообменного элемента. Минимальные значения скорости наблюдаются у переточных трубок, расположенных в центре каждого из четырёх секторов.

Таким образом, число переточных трубок может быть сокращено с учётом необходимой площади поверхности теплообмена. Для первой кольцевой трубки возможно исключить только переточные трубки, расположенные между двумя вводами воды и двумя участками, равноудалёнными от вводов. Для остальных кольцевых трубок возможно аналогичное исключение переточных трубок. Отметим, что уменьшение числа переточных трубок приведёт к уменьшению гидравлического сопротивления теплообменного элемента, что позволит снизить затраты на прокачку теплоносителя.

Полученные характеристики, зависимости и анализ застойных зон и зон максимальной скорости теплоносителя в теплообменном элементе позволяет решать тепловую оптимизационную задачу, что, несомненно, станет объектом дальнейших исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Боттерилл, Дж. Теплообмен в псевдооживленном слое: Гидродинамические характеристики псевдооживленного газом слоя и их влияние на его теплообменные свойства / Дж. Боттерилл; пер. с англ. – М.: Энергия, 1980. – 344 с.
2. Патент № 2474777 С1 Российская Федерация, МПК F26B 17/10, F26B 3/084. Сушилка с псевдооживленным слоем с непрямым подогревом : № 2011125916/06 : заявл. 24.11.2008 : опубл. 10.02.2013 / Х. Й. Клутц, К. Мозер ; заявитель РВЕ ПАУЭР АКЦИЕНГЕЗЕЛЛЬШАФТ. – EDN VSPNGA.
3. Численное исследование гидродинамики газораспределительной решётки для формирования перемешающегося псевдооживленного слоя / А. А. Надеев, Н. Н. Кожухов, Д. А. Прутских, В. Ю. Дубанин // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 135-143. – DOI 10.5281/zenodo.14018663. – EDN DNNAYL.
4. Kuzmin, D. On the Implementation of the k-ε Turbulence Model in Incompressible Flow Solvers Based on a Finite Element Discretization / D. Kuzmin, O. Mierka, S. Turek // Int’l J Computing Science and Mathematics. – 2007. – Vol. 1. – No. 2–4. – P. 193-206.
5. Зуйков, А. Л. Гидравлика: учебник: в 2 томах / А. Л. Зуйков. – 3-е изд., испр. – М.: Издательство МИСИ - МГСУ, 2019. – Т.1. – 544 с.

Поступила в редакцию 06.05.2025 г., рекомендована к печати 23.05.2025 г.

**STUDY OF HYDRODYNAMICS OF SUBMERSIBLE HEAT EXCHANGE ELEMENT
WITH ANNULAR TUBES FOR APPARATUS WITH FLUIDIZED BED**

Nadeev A.A., Kozhukhov N.N., Prutskikh D.A., Dubanin V.IU.

The paper presents the results of numerical modeling of a submersible heat exchange element with annular tubes for cylindrical devices with a moving fluidized bed. A new design option for the heat exchange element is considered. A mathematical model of its operation is compiled and tested for adequacy. As a result of the computational experiment, hydraulic characteristics are obtained for a specific range of coolant flow rates, and an analysis of zones with minimum and maximum velocities is performed. An assessment is made of the effect of a partial change in design on the hydrodynamics of the element.

Keywords: fluidization, submersible element, hydraulic characteristic, annular tubes, moving bed.

Надеев Александр Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,
Российская Федерация, г. Воронеж.
E-mail: anadeev@cchgeu.ru

Nadeev Aleksandr Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering of Voronezh State Technical University,
Russian Federation, Voronezh.

Кожухов Николай Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,
Российская Федерация, г. Воронеж.
E-mail: nnkozhukhov@cchgeu.ru

Kozhukhov Nikolai Nikolaevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering of Voronezh State Technical University,
Russian Federation, Voronezh.

Прутских Дмитрий Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,
Российская Федерация, г. Воронеж.
E-mail: dprutskikh@cchgeu.ru

Prutskikh Dmitrii Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering of Voronezh State Technical University,
Russian Federation, Voronezh.

Дубанин Владимир Юрьевич

кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,
Российская Федерация, г. Воронеж.
E-mail: vdubanin@cchgeu.ru

Dubanin Vladimir Iurevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering of Voronezh State Technical University,
Russian Federation, Voronezh.

CALCULATION OF HEAT REMOVAL FROM A PIPE BURIED IN THE SOIL

© 2025 *Dmitriev A.V., IAKimov N.V., KHarkov V.V., Utkin M.O.*

An analytical solution is developed for steady-state heat transfer from a buried circular pipe to greenhouse soil, modeled using a point source (logarithmic singularity). The source location differs from the pipe center. An approximate heat transfer condition on the soil surface is introduced, with negligible error in practice. Explicit equations are provided for soil temperature distribution, surface temperature, total heat flux from the pipe, and surface heat flux density. This approach addresses sustainable heating using secondary energy resources.

Keywords: thermal power, heat flux density, circular isotherm, temperature distribution.

Introduction. The use of secondary energy resources is a cornerstone of sustainable development. One of the promising areas for the utilization of secondary energy resources is their use in the heating systems of agricultural greenhouses [1–3]. Soil temperature strongly affects seed germination, seeding emergence, root development, and plant growth [4, 5]. Therefore, the optimal temperature of the soil determines a high crop yield. Deviation from optimal thermal conditions results in heat or water loss, bacterial and fungal infections, and reduced soil productivity [6]. Therefore, a topical problem is the thermal calculation of the process of heat removal to the greenhouse soil for its heating, as well as monitoring the effects of various parameters on the temperature conditions of the soil [7, 8]. To solve this problem, it is necessary to develop a mathematical model that describes the process of heat removal to the soil, taking into account various parameters.

The analysis of heat transfer between a heat source and the surrounding soil is a complex problem that requires the consideration of many factors, such as ambient air parameters, soil properties, and design features of heat exchange devices [9, 10]. In particular, the influence of the following parameters on the thermal conditions has been actively studied: pipe length and diameter [11, 12], pipe (buried) depth, soil type [13, 14], pipe number [15, 16], and fluid velocity [14, 17, 18].

To better understand the thermal characteristics of widely used soil heat exchangers, numerous heat transfer models have been developed, which can be divided into analytical models [14, 15, 19, 20] and numerical models [21–26]. The limited applicability of existing models, their complexity, and their weak correlation with experimental data determine the relevance of the issue for calculating the thermal field of the soil.

This study aimed to propose a calculation method for an analytical solution to the problem of heat removal from a circular pipe buried in the soil. The usual way to calculate the thermal field of the soil is based on numerical modeling within the framework of grid methods. The scientific novelty of this work is that an approximate analytical solution is developed, which can be useful when verifying the results of such models. The study is based on a normalized mathematical formulation, which provides explicit equations for the temperature distribution inside the soil and on its surface, for the total heat flux removed from the pipe, and for the distribution of the heat flux density on the soil surface. The feature of this work is to estimate the accuracy of the approximations introduced for the formulated problem.

Problem formulation. We consider steady-state heat removal from a circular pipe of unlimited length located under the horizontal surface of the soil (fig. 1). By R denotes a radius of the pipe, having surface temperature t_w , and by b^* ($b^* > R$) denotes the depth of the buried pipe (the distance from the surface of the soil to the pipe axis). The body of the soil is homogeneous and occupies a half-space; the thermal conductivity coefficient of the soil λ is constant. The heat transfer to air with the coefficient α is set on the surface of the soil. The soil temperature is limited at a distance from the pipe, so this temperature approaches the air temperature t_f ($t_f < t_w$). It is necessary to determine the thermal power Q of the removal of heat from the pipe and the temperature field of the soil, particularly the temperature on its surface t_0 , and the distribution of the heat flux density on the soil surface q_0 .

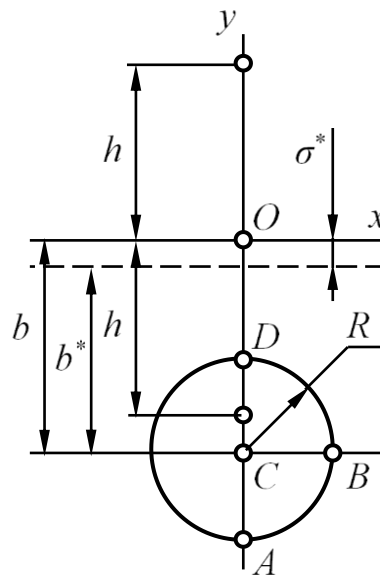


Fig. 1. Calculation scheme

The problem is plane. Instead of temperature t , we consider the excessive temperature $\vartheta = t - t_f$, accordingly denoting $\vartheta_w = t_w - t_f$.

Suppose that the heat flux lines approach the soil surface almost normally. The effect of the thermal resistance of the soil surface can be considered equivalent to the thermal resistance of the soil layer with a thickness of $\sigma^* = \lambda / \alpha$. This is true if the following condition is met:

$$\sigma^* \ll \sqrt{(b^*)^2 - R^2}.$$

Therefore, instead of the initial area, we consider an area with an additional layer with a thickness σ^* placed on top of the initial surface of the soil, where the upper boundary has a temperature equal to the temperature of the air. Therefore, such a ‘normalized’ formulation differs in the pipe depth $b = b^* + \sigma^*$ with the boundary condition (1) on the soil surface, considering that the origin (x, y) lies on the ‘normalized’ soil surface above the center of the pipe, so the y axis is directed vertically upward, and the x axis is horizontal (along the ‘normalized’ surface of the soil). In this case, the center of the pipe is located at $x_c = 0$, $y_c = -b$:

$$\vartheta|_{y=0} = 0. \tag{1}$$

Thus, in this ‘normalized’ mathematical formulation, the required function $\vartheta(x, y)$ must satisfy the equation of steady-state thermal conductivity $\nabla^2 \vartheta = 0$ in the area under consideration $(x^2 + (y+b)^2 > R^2) \cap (y < 0)$ with boundary condition (1) and (2):

$$\vartheta|_{x^2+(y+b)^2=R^2} = \vartheta_w. \quad (2)$$

Solution of the equations. The solution to the problem with a similar mathematical formulation was given in the works of [27, 28] in the form:

$$\vartheta(x, y) = \frac{Q}{2\pi\lambda} \ln \sqrt{\frac{x^2 + (y-h)^2}{x^2 + (y+h)^2}}. \quad (3)$$

where Q is the thermal power removed from the pipe; and where $h = b$ is taken. The following equation links Q and ϑ_w :

$$Q = \frac{2\pi\lambda \vartheta_w}{\ln(2h/R)}.$$

This solution is approximate (discussed in more detail in Subsection Parameter control), although the results have a negligible error at $R \ll h$.

For the general case, an exact solution of the problem is preferable. This solution comes from (3) for two singularities placed in the plane (x, y) : a heat source at the point $x = 0, y = -h$ and a sink at the point $x = 0, y = h$; these singularities have the same intensity Q (not yet specified). Since the isotherms of this temperature field are circular (see Subsection Solution of the equations), the line $y = 0$ with temperature $\vartheta = 0$ is considered a special case of a circle. Naturally, the circles are nonconcentric, and in the half-plane $y < 0$, with an increase in the radius of the circular isotherms, their centers shift downward from the source (fig. 2, at $h = 1$). Therefore, the following condition is observed for an isotherm corresponding to the pipe surface:

$$b - R < h < b. \quad (3a)$$

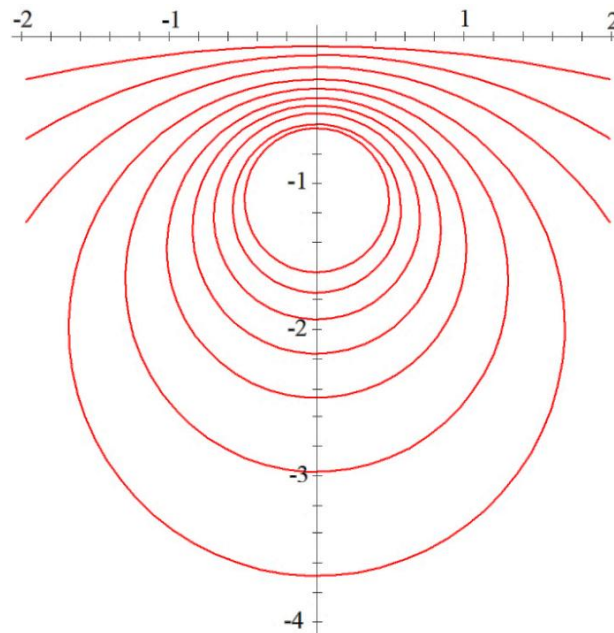


Fig. 2. Isotherms of the temperature field

The heat flux lines are also arcs of circles between these singularities (fig. 3). It is clear that only part of the field at $y < 0$ (more precisely, at $y < -\sigma^*$) has a physical meaning.

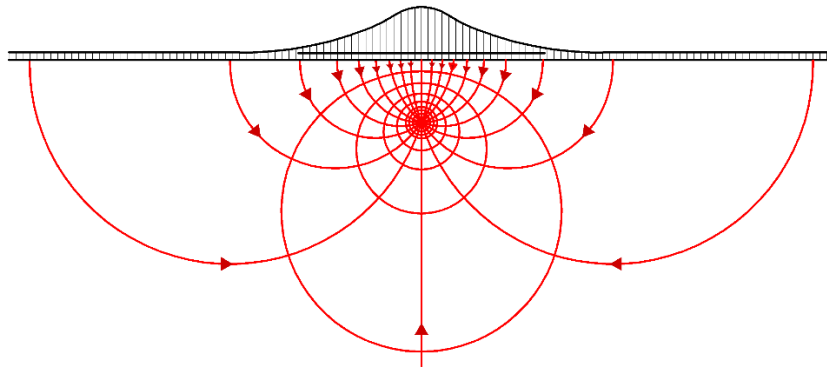


Fig. 3. Flow net

Solution of the equations. Analytical solutions to plane boundary value problems for physical fields are often based on the placement of singularities in the area under consideration [29]. Evidently, the simplest type of singularity is the source at the origin, described for the coordinates (u, v) by the function:

$$\vartheta(u, v) = -\frac{Q}{2\pi\lambda} \ln r, \text{ where } r = \sqrt{u^2 + v^2}. \quad (4)$$

Function (4) can be considered as given on the entire plane (u, v) , except for the point $u = v = 0$. Obviously, this is a mathematical abstraction, for example, owing to the nonphysicality of infinitely negative temperature values ϑ at large r , and infinitely large values at small r .

Note that (4) is harmonic, i.e., it meets the equation of thermal conductivity $\nabla^2 \vartheta = 0$ and describes some conditional temperature fields. The isotherms of the temperature field are concentric circles with $r = \text{const}$, and the heat flux lines are rectilinear rays (coming from the origin), as shown in fig. 4. In particular, a practical solution can be found in any region between two isotherms to address the problem of thermal conductivity of a circular wall.

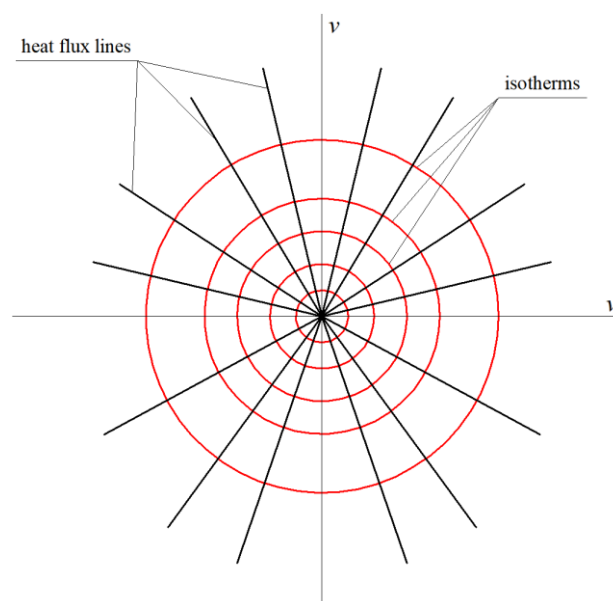


Fig. 4. Temperature chart

An effective way to determine analytical solutions is to use complex variables and functions. If $w = u + iv$, then (4) can be written as:

$$\vartheta = -\frac{Q}{2\pi\lambda} \ln|w|. \quad (5)$$

If $z = x + iy$, then the temperature field can be calculated via (3) according to [27, 28] as follows:

$$\vartheta = \frac{Q}{2\pi\lambda} \ln \left| \frac{z-ih}{z+ih} \right|. \quad (6)$$

As noted above, this is the sum of the source $-\frac{Q}{2\pi\lambda} \ln|z+ih|$ at the point $z = -ih$ and the sink $\frac{Q}{2\pi\lambda} \ln|z-ih|$ at the point $z = ih$. However, function (5) actually describes the field of the source at the origin $w = 0$ and the sink at the point at infinity $w = \infty$. The analytical function $w = \frac{z+ih}{z-ih}$ performs a conformal mapping between the planes of variables z and w , where the points $w = 0$ and $w = \infty$ correspond to the points $z = -ih$ and $z = ih$, respectively. This function is fractionally linear; that is, with this mapping, the circles are mutually transformed into circles [28]. This proves that, in fact, in the z plane the isotherms will also be circular, and the heat flux lines will be arcs of circles ($\vartheta(z) = \vartheta(w(z))$).

Corrected equations. Thus, the temperature field $\vartheta(x, y)$, corresponding to the formulation presented in Section Problem formulation, must have the form of (3), where h is the required parameter. If p is an argument of the logarithm in (3), then:

$$p = \sqrt{\frac{x^2 + (y-h)^2}{x^2 + (y+h)^2}}. \quad (7)$$

Find p at the upper point D and the lower point A of the pipe contour $p_D = \left| \frac{y_D - h}{y_D + h} \right|$ and $p_A = \left| \frac{y_A - h}{y_A + h} \right|$ respectively, taking into account that $x = 0$ and $y_D = -(b-R)$, $y_A = -(b+R)$.

Since the surface of the pipe is an isotherm, so $p_D = p_A$, and with (3a) $\frac{b-R+h}{-b+R+h} = \frac{b+R+h}{b+R-h}$, then $b^2 - (h-R)^2 = (h+R)^2 - b^2$ or:

$$h^2 = b^2 - R^2. \quad (8)$$

Total thermal power. In order to use (3), it is necessary to determine Q . By p_0 denotes p on the contour of the pipe:

$$\begin{aligned} p_0 = p_D &= \frac{h+b-R}{h-b+R} = \frac{\sqrt{b^2-R^2}+b-R}{\sqrt{b^2-R^2}-b+R} = \frac{(\sqrt{b^2-R^2}+b-R)^2}{b^2-R^2-(b-R)^2} = \\ &= \frac{b^2-R^2+b^2-2bR+R^2+2\sqrt{b^2-R^2}(b-R)}{b^2-R^2-b^2+2bR-R^2} = \frac{2b(b-R)+2\sqrt{b^2-R^2}(b-R)}{2b(b-R)}, \end{aligned}$$

so:

$$p_0 = \frac{b}{R} + \sqrt{\left(\frac{b}{R}\right)^2 - 1}. \quad (9)$$

With boundary condition (2), substituting $\vartheta = \vartheta_w$ and $p = p_0$ in (3), we obtain:

$$Q = \frac{2\pi\lambda}{\ln p_0} \vartheta_w. \quad (10)$$

Heat flux on the soil surface. To consider the distribution of the heat flux input from below, we need to calculate the vertical component of the heat flux density. Returning to (6) in terms of identity from [30] and $\vartheta = \operatorname{Re}\left(\frac{Q}{2\pi\lambda} \ln \frac{z-ih}{z+ih}\right)$:

$$\frac{d}{dz} \left(\frac{Q}{2\pi\lambda} \ln \frac{z-ih}{z+ih} \right) = \frac{\partial\vartheta}{\partial x} - i \frac{\partial\vartheta}{\partial y}. \quad (11)$$

We obtain the following:

$$\frac{d}{dz} \left(\ln \frac{z-ih}{z+ih} \right) = \frac{z+ih}{z-ih} \cdot \frac{(z+ih) - (z-ih)}{(z+ih)^2} = \frac{2ih}{z^2 + h^2}. \quad (12)$$

The problem formulation includes finding the distribution $q_0(x)$ of the heat flux density on the soil surface. As noted above, the ‘practical’ surface of the soil in the ‘normalized’ formulation corresponds to the line $y = -\sigma^*$. However, the ‘normalized’ formulation in Section Problem formulation is based on the proximity of these distributions on the lines $y = -\sigma^*$ and $y = 0$. Therefore, it is permissible to take $q_0(x)$ as the distribution $q_0(x) = q_y(x, y)|_{y=0}$ on the ‘normalized’ soil surface. From (11) and (12) it is clear that at $y = 0$ (i.e., $z = x$) $\partial\vartheta/\partial x = 0$ and $q_x = 0$, as according to (1). And:

$$q_0(x) = -\lambda \left. \frac{\partial\vartheta}{\partial y} \right|_{y=0} = \frac{Q}{\pi} \frac{h}{x^2 + h^2}. \quad (13)$$

Equation (13) can be represented in a dimensionless form as the dependence of the dimensionless intensity of heat removal $\pi q_0 h / Q$ on the dimensionless coordinate x / h :

$$\frac{q_0 h}{Q} = \frac{1}{\pi} \frac{1}{1 + (x/h)^2}. \quad (14)$$

In fig. 5 this dependence is shown as a single curve for all the input parameters (see also the velocity curve along the upper boundary in fig. 3). It is evident from the curve that the heat flux density is at a maximum directly above the pipe and decreases, in particular, by 2 times at a distance h (pipe depth).

Since the heat fluxes on the surface are determined, on the basis of Newton's relation for heat transfer $q_0(x) = \alpha(t_0(x) - t_f)$, we can find the temperature distribution $t_0(x)$ of the initial surface of the soil:

$$t_0(x) = t_f + q_0(x) / \alpha. \quad (15)$$

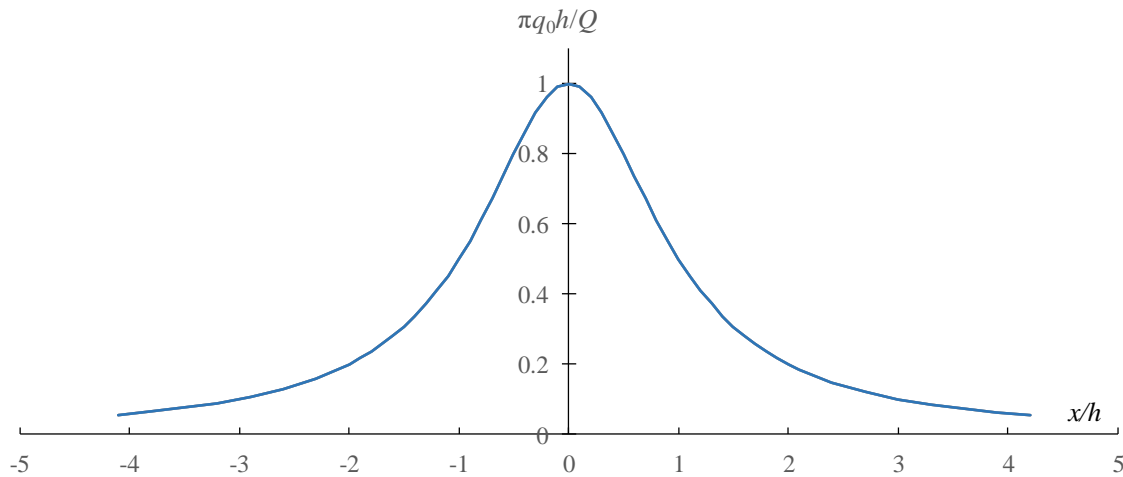


Fig. 5. Heat flux density vs. pipe depth

Parameter control.

a) Next, we estimate the difference between b and h . As noted above, (3) corresponds to the modeling of the temperature field of the pipe by the field from the source located at the point $x = 0, y = -h$, i.e., with an upward shift from the center of the pipe with coordinates $x = 0, y = -b$. As indicated in Section Solution of the equations, $h = b$ [27,28], and to calculate Q via (10), instead of the exact solution for p_0 using (9), we take:

$$p_0 = \frac{2h}{R}. \tag{16}$$

Calculating this shift $\delta = b - h$ via (8) shows that at a sufficiently large relative depth of the pipe this simplification is admissible and results in a small error. Therefore, at $b/R \geq 10$ (five pipe diameters), the δ -value will be less than 5% of the radius R and less than 0.5% of the depth b ; even at $b/R = 5$, δ will be 10 and 2%, respectively. The error in calculating p_0 via (16) for these values of b/R will be even less than 1%. These errors can be considered acceptable. But at a small depth, especially at $b/R < 4$, the errors exceed 12 and 3%, so the simplifications taken are undesirable.

b) Furthermore, we check that the pipe contour is an isotherm. As mentioned above, isotherms of the temperature field via (3) have the shape of circles, in particular, an isotherm with $\vartheta = \vartheta_w$, corresponding to the boundary of the pipe. The temperatures at the upper point D ($x = 0, y = -b + R$) and lower point A ($x = 0, y = -b - R$) of the contour are equal in construction, since $p_D = p_A = p_0$. For verification, via (7), we find p at the ‘right’ point B of the contour, where $x = R, y = -b$:

$$p_B = \sqrt{\frac{x^2 + (y-h)^2}{x^2 + (y+h)^2}} = \sqrt{\frac{R^2 + (b+h)^2}{R^2 + (b-h)^2}} = \sqrt{\frac{R^2 + b^2 + 2bh + h^2}{R^2 + b^2 - 2bh + h^2}}.$$

Substituting (8) yields:

$$p_B = \sqrt{\frac{R^2 + b^2 + 2bh + b^2 - R^2}{R^2 + b^2 - 2bh + b^2 - R^2}} = \sqrt{\frac{2b(b+h)}{2b(b-h)}} = \sqrt{\frac{(b+h)(b+h)}{(b-h)(b+h)}} = \frac{b+h}{\sqrt{b^2 - b^2 + R^2}},$$

and via (9), we get $p_B = \frac{b + \sqrt{b^2 - R^2}}{R} = p_0$.

Therefore, at this point of the circle, the parameter p and, correspondingly, the temperature are equal in accordance with (3) to the values at points D and A . This confirms that this circle is an isotherm.

Algorithm for solving the problem. Thus, in the initial formulation, the following parameters are set: pipe radius R , pipe depth b^* , surface temperature t_w , and the thermal conductivity coefficient of the soil λ . On the surface of the soil the heat transfer coefficient α at the air temperature t_f is set. The total thermal power Q , the distribution of the heat flux density q_0 , and the temperature on the soil surface t_0 must be determined.

The proposed solution consists of calculating the following values: the temperature difference $\vartheta_w = t_w - t_f$, the ‘normalized’ pipe depth $b = b^* + \sigma^*$ (where $\sigma^* = \lambda / \alpha$), the parameter p_0 via (9), and the thermal power Q using (10). After finding the parameter h via (8), it is possible to determine the distribution $q_0(x)$ using (13) or (14), as well as $t_0(x)$ via (15).

If temperatures at other points in the soil or other characteristics are needed, (3) can be used, taking into account that $\vartheta = t - t_f$, and $y = -\sigma^*$ on the ‘practical’ soil surface, so that at the soil points $y < \sigma^*$.

Estimated accuracy of heat transfer. The analytical solution to the problem is exact for the ‘normalized’ formulation presented in Section Problem formulation, but this formulation contains an approximation of substituting the heat transfer condition with a fictitious layer of soil with a thickness σ^* . The nature of the errors introduced by this substitution requires a close estimation.

a) Variable heat transfer coefficient $\tilde{\alpha}(x)$. The real boundary of the soil in the formulation (Section Problem formulation) corresponds to the line $y = -\sigma^*$, where for the initial formulation, the Newton–Richman heat transfer condition must be met in the form $\frac{\partial \vartheta}{\partial y} = -\frac{\alpha}{\lambda} \vartheta$, where $\alpha = \text{const}$ is the given heat transfer coefficient. This condition is not strictly met in the case of the proposed solution to the problem. However, we can assume that this condition works for some variable coefficient $\tilde{\alpha}(x)$:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial y} = -\frac{\tilde{\alpha}(x)}{\lambda} \vartheta \text{ at } y = -\sigma^*. \quad (17)$$

By comparing $\tilde{\alpha}$ and α , we can estimate the accuracy of the substitution performed.

b) Dimensionless variables. The error clearly depends on the relative thickness σ^*/h of the fictitious layer introduced. This thickness is directly related to the conditional Bio number of the problem ($\text{Bi} = \frac{\alpha \cdot h}{\lambda}$); therefore, $\frac{\sigma^*}{h} = \frac{1}{\text{Bi}}$. Accordingly, the following calculations are performed in the dimensionless form by introducing the dimensionless variables $X = x/h$, $Y = y/h$, and $\Theta = \vartheta \cdot \lambda / Q$. Then by (3):

$$\Theta = \frac{1}{4\pi} \ln \frac{X^2 + (1-Y)^2}{X^2 + (1+Y)^2}. \quad (18)$$

and differentiation of (3) or (18), we get:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial Y} = -\frac{1}{\pi} \frac{X^2 + 1 - Y^2}{(X^2 + 1 - Y^2)^2 + 4X^2Y^2}. \quad (19)$$

If $Bi = \frac{\tilde{\alpha} \cdot h}{\lambda}$, then from (17) we obtain that:

$$\frac{1}{Bi} = - \left. \frac{\partial \Theta}{\partial Y} \right|_{Y=-\frac{1}{Bi}}. \quad (20)$$

c) Estimation of $\tilde{\alpha}$ at $x = 0$. First, we analyze the accuracy of α at the point of the soil surface directly above the pipe, i.e., at $X = 0, Y = -1/Bi$. When $X = 0$, from (19), we get $\frac{\partial \Theta}{\partial Y} = -\frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{1-Y^2}$, and from (18), taking into account the known expansion in a series $\ln \frac{1-\phi}{1+\phi} = -2(\phi + \frac{\phi^3}{3} + \frac{\phi^5}{5} + \dots)$, we obtain $\Theta = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{1-Y}{1+Y} = -\frac{Y}{\pi} (1 + \frac{Y^2}{3} + \frac{Y^4}{5} + \dots)$. Then at $X = 0$, substituting in (20), we get the following:

$$\frac{1}{Bi} = - \left. \frac{\partial \Theta}{\partial Y} \right|_{Y=-\frac{1}{Bi}} = -Y (1 + \frac{Y^2}{3} + \frac{Y^4}{5} + \dots) (1-Y^2) \Big|_{Y=-\frac{1}{Bi}} = \frac{1}{Bi} \left[1 - \frac{2}{3} \left(\frac{1}{Bi} \right)^2 + O\left(\frac{1}{Bi^4} \right) \right].$$

This value is compared with the heat transfer given at this point via (21):

$$\frac{\alpha}{\tilde{\alpha}} = \frac{Bi}{Bi} \Big|_{Y=-\frac{1}{Bi}} = 1 - \frac{2}{3} \left(\frac{1}{Bi} \right)^2 + O\left(\frac{1}{Bi^4} \right). \quad (21)$$

Therefore, the relative error in the heat transfer rate at this point for a small $1/Bi$ is approximately $\frac{2}{3} \left(\frac{1}{Bi} \right)^2$. Moreover, calculations show (see the paragraph below) that for other points of the boundary the error (in absolute value) is even lower. Thus, this is a general estimation of the accuracy for α along the entire boundary.

d) As an example, suppose that $\lambda = 0.5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $\alpha = 10 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, the depth of the pipe $b^* = 0.5 \text{ m}$ with diameter $2R = 0.2 \text{ m}$. Additionally, $\sigma^* = 0.05 \text{ m}$, $b = 0.55 \text{ m}$, $h = 0.54$, $Bi = 10.8$, and the relative error $\frac{2}{3} \left(\frac{1}{Bi} \right)^2 = 0.0057$. Calculations of the temperature field according to (3) and the developed calculation algorithm are performed for heat transfer with a value-added height above the pipe compared to the initial set of a half percent. This error can be considered to be insignificant for most practical problems. If α or b^* increases and λ or R decreases, then this error will be even smaller.

e) Calculation of the distribution $\tilde{\alpha}(x)$ along the boundary of the soil. The results of the calculations using (22), (18), and (19) show that the excess of $\tilde{\alpha}$ over the initial value α is maximized exactly at point $X = 0$ (over the pipe), and this excess fully corresponds to (21). With distance from this point, the error decreases and reaches zero at X slightly more than half. This point is the same for all Bi numbers. Furthermore, the $\tilde{\alpha}$ -value is undersized, although even the maximum decrease (in absolute value) is less than the maximum increase.

Figure 6 shows the distribution curves $\tilde{\alpha}(x)/\alpha$ for different Bi numbers. After reaching a minimum, the ratio $\tilde{\alpha}(x)/\alpha$ tends to zero with increasing x (see the next paragraph). Specifically, the error of the calculated temperatures and the heat fluxes decreases with an increasing x , not only because these values approach zero. Additionally, the accuracy of accounting $\tilde{\alpha}$ also increases, albeit relatively slowly. The average distribution $\tilde{\alpha}(x)$ approximately corresponds to the initial α -value (see also paragraph below).

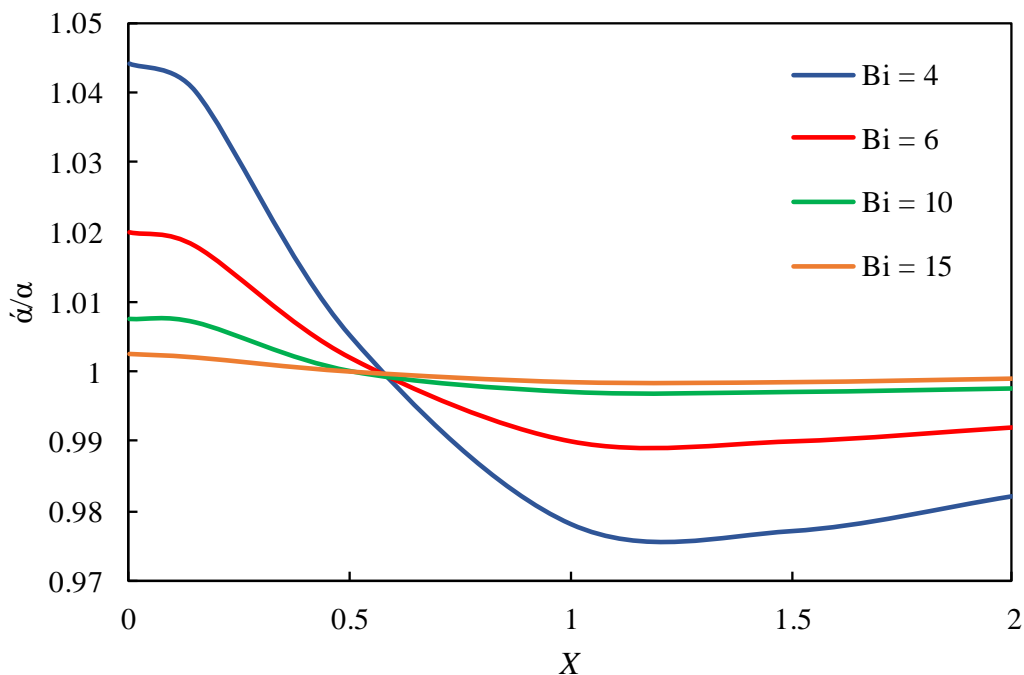


Fig. 6. Distribution $\tilde{\alpha}(x)/\alpha$

f) Behavior of $\tilde{\alpha}$ at a distance. From Fig. 6 it is not seen that the curves on the right approach zero. This fact is clear from the calculations for $X \geq 10$, so we obtain this analytically.

We next show that with increasing x , the value of $\tilde{\alpha}(x)/\alpha$ tends to zero, i.e.:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\tilde{\alpha}}{\alpha} = \lim_{X \rightarrow \infty} \frac{\overline{\text{Bi}}}{\text{Bi}} = 1.$$

By (20), we get the following:

$$\frac{\overline{\text{Bi}}}{\text{Bi}} = - \frac{1}{\text{Bi}} \frac{\partial \Theta}{\partial Y} \bigg|_{Y = \frac{1}{\text{Bi}}} \quad (22)$$

From (18):

$$\Theta = \frac{1}{4\pi} \ln \frac{X^2 + (1-Y)^2}{X^2 + (1+Y)^2} = \frac{1}{4\pi} \ln \frac{X^2 + (1+Y)^2 + (1-Y)^2 - (1+Y)^2}{X^2 + (1+Y)^2} =$$

$$= \frac{1}{4\pi} \ln\left(1 + \frac{(1-Y+1+Y)(1-Y-1-Y)}{X^2 + (1+Y)^2}\right) = \frac{1}{4\pi} \ln\left(1 - \frac{2 \cdot 2Y}{X^2 + (1+Y)^2}\right),$$

therefore, at $X \rightarrow \infty$, we have:

$$\Theta \sim -\frac{1}{4\pi} \cdot \frac{4Y}{X^2} = -\frac{Y}{\pi X^2}. \quad (23)$$

Using (19):

$$\frac{\partial \Theta}{\partial Y} = -\frac{1}{\pi} \frac{X^2 + 1 - Y^2}{(X^2 + 1 - Y^2)^2 + 4X^2Y^2} = -\frac{1}{\pi} \frac{1}{(X^2 + 1 - Y^2) + \frac{4X^2Y^2}{X^2 + 1 - Y^2}},$$

and at $X \rightarrow \infty$, we get:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial Y} \sim -\frac{1}{\pi} \frac{1}{X^2}. \quad (24)$$

Substituting (23) and (24) into (22) yields:

$$\lim_{X \rightarrow \infty} \frac{\overline{\text{Bi}}}{\text{Bi}} = -\frac{1}{\text{Bi}} \cdot \lim_{X \rightarrow \infty} \frac{\frac{\partial \Theta}{\partial Y}}{\Theta} = -\frac{1}{\text{Bi}} \cdot \lim_{X \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{\pi X^2}}{\frac{Y}{\pi X^2}} = -\frac{1}{\text{Bi}} \cdot \frac{1}{Y},$$

and, taking into account that on the line of the soil surface $Y = -1/\text{Bi}$, we obtain the following:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\tilde{\alpha}}{\alpha} = \lim_{X \rightarrow \infty} \frac{\overline{\text{Bi}}}{\text{Bi}} = 1.$$

g) About the variability of the distribution $\tilde{\alpha}$. Certainly, under real conditions, heat transfer on the soil surface is realized either by free convection (in a greenhouse, etc.), or by a free-convective mechanism (wind, blowing, etc.). In the case of free convection, the heat transfer coefficient directly depends on the temperature difference, so the ‘canonical’ condition $\alpha = \text{const}$ is an idealization or an approximate simplification of the real situation. Therefore, the variability of the heat transfer coefficient, when it slightly increases in the area of the main heat fluxes of the soil above the pipe and decreases together with the temperature, changes the solution toward the real situation (of course, insignificantly).

Conclusions. This paper proposes the use of recovered system thermal loss to heat the soil of agricultural greenhouses, where maintaining an optimal temperature regime is extremely important for the yield of crops. Numerical mathematical models are complex because many factors influence the temperature distribution process in the soil. The authors present an analytical solution to the problem of heat removal to the soil surface from a buried pipe. The problem is one-dimensional and is considered under steady-state conditions. The temperature field is modeled by a distribution from a point source (logarithmic singularity of the harmonic function). It has been proven that the isotherms of the temperature field are circular. The location of the heat source in the exact formulation does not coincide with the center of the pipe. The condition of heat transfer on the soil surface is substituted by the approximate condition.

An estimation of the accuracy of such a substitution is given; it is shown that in practical problems, even with sufficiently large relative depths of the pipe, such a simplification is permissible and results in a small error. Explicit equations are presented for the temperature distribution in the soil and on its surface, for the total heat flux removed from the pipe, and for the distribution of the heat flux density on the surface of the soil. The calculation algorithm has been described for solving the problem of steady-state heat removal from a circular pipe buried in a soil body at a certain depth.

In the future, on the basis of the developed calculation method, the influence of the length and shape of the pipe, as well as the number of pipes on the temperature field of the soil during heat removal, should be studied.

REFERENCES LIST

1. Jilani, Md. N. H. Computational fluid dynamics simulation of earth air heat exchanger combined with the Quonset type greenhouse to develop a sustainable controlled environment / Md. N. H. Jilani, P. K. Mohapatra // *Geothermics*. – 2024. – Vol. 116. – P. 102845. – DOI 10.1016/j.geothermics.2023.102845.
2. Structural design method, validation, and performance analysis of an earth-air heat exchanger for greenhouses / J. Xiao, Y. Hu, Q. Wang, J. Li // *Geothermics*. – 2023. – Vol. 111. – P. 102718. – DOI 10.1016/j.geothermics.2023.102718. – EDN UMIOBB.
3. Design challenges of agricultural greenhouses in hot and arid environments – A review / S. Ghani, F. Bakochristou, E. M. A. A. Elbially [et al.] // *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. – 2019. – Vol. 12, No. 1. – P. 48–70. – DOI 10.1016/j.eaef.2018.09.004. – EDN TIIDHC.
4. Hillel, D. Thermal properties and processes / D. Hillel // *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Elsevier, 2005. – P. 156–163.
5. Towards automated greenhouse: A state of the art review on greenhouse monitoring methods and technologies based on internet of things / H. Li, Y. Guo, H. Zhao [et al.] // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2021. – Vol. 191. – P. 106558. – DOI 10.1016/j.compag.2021.106558. – EDN SFMPZE.
6. Baptista, F.J.F. Modelling the climate in unheated tomato greenhouses and predicting Botrytis cinerea infection: Doctoral dissertation / F.J.F. Baptista. – Portugal: Universidade de Evora, 2007. – 180 p.
7. Performance analysis of an earth–air heat exchanger integrated into an agricultural irrigation system for a greenhouse environmental temperature-control system / L.-H. Yang, B.-H. Huang, C.-Y. Hsu [et al.] // *Energy and Buildings*. – 2019. – Vol. 202. – P. 109381.
8. Optimizing the thermal environment of greenhouse with multi-pipe earth-to-air heat exchanger system using the Taguchi method / Di. Qi, Q. Liu, Ch. Zhao [et al.] // *Applied Thermal Engineering*. – 2024. – Vol. 242. – P. 122469. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2024.122469. – EDN DCYJUR.
9. Enhancing the thermal performance of an agricultural solar greenhouse by geothermal energy using an earth-air heat exchanger system: A review / N. S. Dhaidan, W. A. M. Al-Shohani, H. H. Abbas [et al.] // *Geothermics*. – 2024. – Vol. 123. – P. 103115. – DOI 10.1016/j.geothermics.2024.103115.
10. Advances in ground heat exchangers for space heating and cooling: Review and perspectives / P. Cui, W. Yang, W. Zhang [et al.] // *Energy and Built Environment*. – 2024. – Vol. 5, No. 2. – P. 255-269. – DOI 10.1016/j.enbenv.2022.10.002. – EDN ZEVPA.
11. Frequency-dependent thermal resistance of vertical U-tube geothermal heat exchangers / B. S. Tilley, V. C. Yang, J. C. Baiense [et al.] // *Journal of Engineering Mathematics*. – 2017. – Vol. 102, № 1. – P. 131–150.
12. Experimental and numerical study of the characteristics of finned-tube oil radiators of power engineering devices / A. N. Skrypnik, A. M. Ermakov, R. T. Kalimullin [et al.] // *Heat Transfer Research*. – 2020. – Vol. 51, No. 14. – P. 1261-1271. – DOI 10.1615/HEATTRANSRES.2020035459. – EDN NYDZRO.
13. Ghosal, M. K. Parametric studies for heating performance of an earth to air heat exchanger coupled with a greenhouse / M. K. Ghosal, G. N. Tiwari // *International Journal of Energy Research*. – 2005. – Vol. 29, № 11. – P. 991–1005. – DOI 10.1002/er.1106.
14. Nauta, A. Simulation of an Earth-Air Heat Exchanger in a Commercial Greenhouse to Improve Energy Efficiency / A. Nauta, S. H. Tasnim, W. D. Lubitz // *Journal of Biosystems Engineering*. – 2023. – Vol. 48, No. 3. – P. 291-308. – DOI 10.1007/s42853-023-00188-8. – EDN AAHLDV.
15. Hegazy, A. Closed Greenhouse Heating in an Arid Egyptian Winter Using Earth-Air Heat Exchangers / A. Hegazy, A. Subiantoro, S. Norris // *Proceedings of the ASME 2021 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 11: Heat Transfer and Thermal Engineering*. – 2021. – V011T11A077. – DOI 10.1115/IMECE2021-69509.

16. Structural optimization of multi-pipe earth to air heat exchanger in greenhouse / Di. Qi, Sh. Li, Ch. Zhao [et al.] // *Geothermics*. – 2022. – Vol. 98. – P. 102288. – DOI 10.1016/j.geothermics.2021.102288. – EDN XOAIMQ.
17. Morshed, W. Heating performance of the PVC earth-air tubular heat exchanger applied to a greenhouse in the coastal area of west Syria: An experimental study / W. Morshed, L. Abbas, H. Nazha // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2022. – Vol. 27. – P. 101000. – DOI 10.1016/j.tsep.2021.101000. – EDN GFUEUP.
18. Evaluation of thermal performance of single pass earth–air heat exchanger in heating mode / N. Deldan, A. Rajan, V. S. Hans, A. Kaushal // *Environmental Progress & Sustainable Energy*. – 2017. – Vol. 36, № 4. – P. 1253–1261. – DOI 10.1002/ep.12566.
19. Metz, P. D. A Simple Computer Program to Model Three-Dimensional Underground Heat Flow With Realistic Boundary Conditions / P. D. Metz // *Journal of Solar Energy Engineering*. – 1983. – Vol. 105, № 1. – P. 42–49. – DOI 10.1115/1.3266345.
20. Hepbasli, A. Low exergy modelling and performance analysis of greenhouses coupled to closed earth-to-air heat exchangers (EAHEs) / A. Hepbasli // *Energy and Buildings*. – 2013. – Vol. 64. – P. 224–230. – DOI 10.1016/j.enbuild.2013.05.012.
21. Khatoon, Z. Numerical Analysis of Thermal Properties in Ground-Coupled Heat Exchanger / Z. Khatoon, R. Srivastava, V. K. Patel / *Recent Advances in Mechanical Engineering, Volume 1. ICMech-REC 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – Singapore: Springer, 2024. – P. 373–386. – DOI 10.1007/978-981-97-0918-2_30.
22. A new heat transfer model for single U-pipe ground heat exchanger / C.-L. Wang, H. Li, Y.-H. Lu [et al.] // *Applied Thermal Engineering*. – 2019. – Vol. 154. – P. 400–406. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2019.03.115.
23. Development of an efficient numerical model and analysis of heat transfer performance for borehole heat exchanger / X. Yu, H. Li, Sh. Yao [et al.] // *Renewable Energy*. – 2020. – Vol. 152. – P. 189–197. – DOI 10.1016/j.renene.2020.01.044. – EDN LXMSTI.
24. Ghosal, M. K. Modeling and comparative thermal performance of ground air collector and earth air heat exchanger for heating of greenhouse / M. K. Ghosal, G. N. Tiwari // *Energy and Buildings*. – 2005. – Vol. 37, № 6. – P. 613–621. – DOI 10.1016/j.enbuild.2004.09.004.
25. Zhang, L. A transient quasi-3D entire time scale line source model for the fluid and ground temperature prediction of vertical ground heat exchangers (GHEs) / L. Zhang, Q. Zhang, H. Gongsheng // *Applied Energy*. – 2016. – Vol. 170. – P. 65–75. – DOI 10.1016/j.apenergy.2016.02.099.
26. Thermal-hydraulic performance of a single round tube with surface vort generators / A. N. Skrypnik, A. D. Chorny, I. A. Popov [et al.] // *Heat Transfer Research*. – 2022. – Vol. 53, No. 9. – P. 29–41. – DOI 10.1615/HEATTRANSRES.2022041164. – EDN KSFAIR.
27. Ведерников, В. В. Теория фильтрации и её применение в области ирригации и дренажа / В. В. Ведерников. – Москва: Государственное издательство строительной литературы, 1939. – 251 с.
28. Полубаринова-Кочина, П. Я. Теория движения грунтовых вод / П. Я. Полубаринова-Кочина. – Москва: Наука, 1977. – 664 с.
29. Кибель, И. А. Теоретическая гидромеханика / И. А. Кобель, Н. Е. Кочин, Н. В. Розе. – Москва: Государственное издательство физико-математических литературы, 1963. – 583 с.
30. Лаврентьев, М. А. Методы теории функций комплексного переменного / М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. – Москва: Наука, 1973. – 736 с.

Поступила в редакцию 14.05.2025 г., рекомендована к печати 02.06.2025 г.

РАСЧЁТ ТЕПЛОТВОДА ОТ ТРУБЫ В ГРУНТЕ

Дмитриев А.В., Якимов Н.В., Харьков В.В., Уткин М.О.

Разработано аналитическое решение задачи отвода тепла в почву теплицы от заглубленной в нее круглой трубы. Задача рассматривается в плоской постановке в стационарных условиях. Температурное поле моделируется распределением от точечного источника (логарифмическая особенность). Местоположение источника в случае точной постановки не совпадает с центром трубы. Условие теплопередачи на поверхности почвы заменяется приближенным с незначительной погрешностью на практике. Приведены явные уравнения для распределения температуры внутри почвы и на ее поверхности, для полного теплового потока, отводимого от трубы, и для распределения плотности теплового потока на поверхности почвы.

Ключевые слова: тепловая мощность, плотность теплового потока, круговая изотерма, распределение температуры.

Дмитриев Андрей Владимирович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань.
E-mail: ieremiada@gmail.com

Dmitriev Andrei Vladimirovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Automation of Technological Processes and Production of Kazan State Power Engineering University, Russian Federation, Republic of Tatarstan, Kazan.

Якимов Николай Дмитриевич

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры автоматизации технологических процессов и производств ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань.
E-mail: nyakimov@inbox.ru

Iakimov Nikolai Dmitrievich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor at Department of Automation of Technological Processes and Production of Kazan State Power Engineering University, Russian Federation, Republic of Tatarstan, Kazan

Харьков Виталий Викторович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры оборудования пищевых производств ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань.
E-mail: v.v.kharkov@gmail.com

Kharkov Vitalii Viktorovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Food Production Equipment of Kazan National Research Technological University, Russian Federation, Republic of Tatarstan, Kazan.

Уткин Максим Олегович

аспирант кафедры автоматизации технологических процессов и производств ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань.
E-mail: 209maks@mail.ru

Utkin Maksim Olegovich

Postgraduate Student at Department of Automation of Technological Processes and Production of Kazan State Power Engineering University, Russian Federation, Republic of Tatarstan, Kazan.

ПРИМЕНЕНИЕ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАБОТЫ МАЛОГАБАРИТНОЙ ПЛЕНОЧНОЙ ГРАДИРНИ

© 2025 Карнаух В.В., Бирюков А.Б., Панюжев А.А.

В статье рассматривается вопрос прогнозирования работы малогабаритной пленочной градирни, используемой для охлаждения оборотной воды производственного предприятия. Выполнена оценка значимости влияния метеорологических, технологических и конструктивных параметров на степень охлаждения воды с применением многофакторных регрессионных моделей. Анализ результатов показал, что наиболее значимые факторы, влияющие на степень охлаждения воды в пленочной градирне, это температура воды на входе в градирню, скорость воздуха и объемный коэффициент массоотдачи, который определяется конкретным типом оросителя.

Ключевые слова: оборотная вода, пленочная градирня, насадочный слой, испарительное охлаждение степень охлаждения воды, регрессионный анализ.

Введение. К устройствам, предназначенным для охлаждения технологической оборотной воды на пищевых предприятиях, относятся градирни, чиллеры, испарительные конденсаторы, испарители теплонасосных установок. В указанном водоохлаждающем оборудовании осуществляются такие процессы отвода тепловых потоков как тепломассоперенос (в градирнях) и теплопередача (в чиллерах, испарителях ТНУ) при этом речь идет о естественном (испарительном) и пароконвективном охлаждении [1-4].

Принципиально все виды градирен делятся на открытые, закрытые и смешанные. Подробная классификация градирен с учетом направления контакта сред и способа организации тяги приведена в [1, 4]. На степень охлаждения воды в градирне любой конструкции прямое влияние оказывает организация тепломассообменных процессов в рабочей зоне. Зачастую там устанавливается насадочный слой - ороситель, конфигурация которого имеет доминирующее влияние на степень охлаждения оборотной воды.

Известно, что оросители классифицируются по состоянию и назначению на: фиксированные (к ним относятся регулярные) и псевдооживленные (к ним относятся свободные). Объемный коэффициент массоотдачи оросителя β_{pv} определяется на основании экспериментов для каждой конкретной конструкции оросителя в диапазоне рабочих скоростей воздуха и удельных гидравлических нагрузок.

За последние десятилетия появилось достаточно много работ, в которых предлагаются и экспериментально изучаются конструктивные модификации насадок (оросителей) градирен, принципиально новые формы и даже материалы, а также проводятся исследования по безнасадочным конструкциям [5].

Градирни относятся к вспомогательному оборудованию, поддерживающему целостность и относительную стабильность производственных процессов, при этом нельзя недооценивать тот факт, что от качества работы градирни (обеспечение снижения температуры воды) зависит требуемый расход воды в оборотной системе, напрямую определяющий расход электроэнергии на ее перекачку, а также надежность и технико-экономические показатели работы технологического оборудования.

Работа градирни как контактного смесительного теплообменного аппарата определяется множеством факторов: технологическими (расход оборотной воды, $G_{\text{ж}}$, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$), удельный расход воздуха $\lambda = \frac{G_{\text{г}}}{G_{\text{ж}}}$ отношение массового расхода воздуха к массовому расходу воды, количество теплоты, которую необходимо отвести от продуктов, аппаратов или охлаждаемого оборудования – удельная тепловая нагрузка $Q_{\text{уд}}$, $\text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, требования к устойчивости охладительного эффекта), метеорологическими (температура, относительная влажность входящего воздуха, температура по смоченному термометру атмосферного воздуха), экологическими (провоцирование эрозии близлежащей почвы, шумовое загрязнение, сложная утилизация полимерных конструктивных элементов, потребление электроэнергии), химическими (химический состав добавочной и оборотной воды, соответствие санитарно-гигиеническим требованиям), экономическими (текущие и амортизационные затраты).

Авторы [3] отмечают, что наибольшее влияние на процесс охлаждения воды оказывают четыре фактора: перепад температур воды Δt , $^{\circ}\text{C}$; температура окружающего воздуха $t_{\text{г}}$, $^{\circ}\text{C}$; относительная влажность воздуха φ , %; подача насоса Q , $\text{м}^3/\text{ч}$.

Нормативными параметрами эксплуатации градирен являются: удельная тепловая нагрузка $Q_{\text{уд}}$, $\text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; перепад температур воды $\Delta t = t_{\text{ж1}} - t_{\text{ж2}}$, $^{\circ}\text{C}$; удельная гидравлическая нагрузка $G_{\text{уд}}$, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; разность температур охлажденной воды и воздуха по смоченному термометру, $\delta = t_{\text{ж2}} - t_{\text{см.т}}$, $^{\circ}\text{C}$.

Как отмечается в работе [6] при выполнении теплотехнических расчетов определяют температуру охлажденной в градирне воды $t_{\text{ж2}}$, плотности орошения $q_{\text{ж}}$ и площади орошения градирни F . Значение $t_{\text{ж2}}$ оказывает существенное влияние на параметры технологического процесса, в частности, на значение температуры охлаждаемого теплоносителя (усл. Продукта) $t_{\text{пр}}$, размеры градирен, диаметры труб, подачу насосов, потребление электроэнергии. Значительное повышение $t_{\text{пр}}$ в результате увеличения разности $t_{\text{пр}} - t_{\text{ж2}}$ или увеличения $t_{\text{ж2}}$ может повлечь за собой снижение качества продукции и уменьшение производительности технологических установок. Целесообразно определять $t_{\text{пр}}$ и $t_{\text{ж2}}$, исходя из требований технологического процесса и экономических соображений путем расчетов совместной работы ТОО, градирни и циркуляционной насосной станции.

Для оценки эффективности работы градирни в водооборотном цикле используются следующие коэффициенты [1, 4]:

– термический коэффициент полезного действия градирни, %:

$$E_{\text{ж}} = \frac{t_{\text{ж1}} - t_{\text{ж2}}}{t_{\text{ж1}} - t_{\text{см.т}}}.$$

где $t_{\text{ж1}}$ – температура воды на входе в градирню, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{ж2}}$ – температура воды на выходе и градирни, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{см.т}}$ – температура атмосферного воздуха по смоченному термометру, $^{\circ}\text{C}$ (теоретический предел охлаждения воды в градирне);

– степень использования воздуха $E_{\text{г}}$, %:

$$E_{\text{г}} = \frac{h_{\text{г2}} - h_{\text{г1}}}{h_{\text{г2}}^* - h_{\text{г1}}}, \quad (1)$$

где $h_{\text{г2}}^*$ – удельная энтальпия насыщенного воздуха, $\text{кДж}/\text{кг}$;

– коэффициент эффективности градирни, %:

$$\eta_{\text{эф}} = \frac{t_{\text{ж}2}^{\text{н}} - t_{\text{см.т.}}}{t_{\text{ж}2}^{\text{ф}} - t_{\text{см.т.}}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{ж}2}^{\text{н}}$, $t_{\text{ж}2}^{\text{ф}}$ – нормативное и фактически значения температуры охлажденной воды, °С;

– критерий эффективности работы градирен:

$$K_{\text{ЭРГ}} = \Delta t / t_{\text{ж}2}. \quad (3)$$

В формулы (1)-(3) входит разность значений температуры воды. В отличие от E и $\eta_{\text{эф}}$, коэффициент Кэрг является интегральным показателем эффективности работы градирен, учитывающим все условия эксплуатации градирен. Значение Кэрг всегда меньше единицы.

Для повышения качества проектного расчета степени охлаждения воды Δt , авторы поставили себе цель получить новые, более точные, статистические формулы для определения Δt и на основании ряда экспериментальных работ и определить степень влияния метеорологических, технологических и конструктивных параметров (факторов) на ее величину.

В такой ситуации целесообразно воспользоваться методами регрессионного анализа, на основе которых в ряде случаев можно получить вероятностно-статистические модели, реализующие зависимость $\Delta t = f(t_{\text{ж}1}, t_{\text{г}}, v_{\text{г}}, \varphi, \beta_{\text{pv}})$.

Объектом наших исследований является малогабаритные противоточные градирни с насадочным слоем пленочного типа в рабочей зоне.

Цель работы: прогнозирование параметров работы малогабаритной пленочной градирни на основе корреляционно-регрессионного анализа.

Основной материал исследования. Для достижения поставленной цели авторы собрали статистику – результаты тепломассообменных испытаний для насадок регулярной структуры, имеющих высокоразвитую структурированную поверхность из полимерных материалов (полиэтилена низкого давления, полипропиленовых листов) представленную в открытом доступе (таблица 1) при плотности орошения $q_{\text{ж}} = 8,8 \dots 9,0 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$.

Таблица 1. Типы насадок, используемых в малогабаритных противоточных аппаратах для исследования процессов тепломассообмена

Тип насадки	Особенности профиля насадки и укладки в рабочей зоне градирни	Материал	Источник
Короткослоевая насадка КСН-1	Ярусы одинаковой высоты, расположенные с поворотом каждого последующего яруса на 90° в горизонтальной плоскости по отношению к предыдущему. Насадка КСН-1 состоит из трех ярусов высотой по $h = 0,3$ м и двух разрывов по $\delta = 0,03$ м каждый. Общая высота блока $H = 0,96$ м.	Полимер	[7]
Короткослоевая насадка КСН-2	Насадка КСН-2 состоит из шести ярусов высотой по $h = 0,15$ м и пяти разрывов высотой по $\delta = 0,03$ м. Общая высота блока $H = 1,05$ м.	Полимер	[7]

Насадка из гладких труб	Наружный диаметр труб $d = 50$ мм	Полиэтилен	[8]
Насадка из гофрированных труб	Наружный диаметр труб $d = 50$ мм	Полиэтилен	[8]
комбинированная насадка из гофрированных труб и гофрированных труб 0,2 м в навал	Верхний хаотичный слой (высота $h_2 = 0,2$ м) из полиэтиленовых колец (50x50мм) (т.е. аналог колец Рашига 50x50мм) Высота регулярной насадки $H_1 = 1,0$ м; нерегулярной $H_2 = 0,2$ м. Общая высота комбинированной насадки $H = 1,2$ м.	Полиэтилен	[8]

С помощью встроенного анализа в табличном процессоре Microsoft Excel построена матрица корреляционной зависимости факторов и целевой функции (таблица 2).

Таблица 2. Статистические данные для построения модели

Номер п/п	Степень охлаждения воды Δt , °С	Температура воды, $t_{ж1}$, °С	Температура воздуха $t_{г}$, °С	Скорость воздуха, v , м/с	Относительная влажность φ , %	Объемный коэффициент массоотдачи, β_{pv}
	y	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	3,54	35,33	26,4	0,82	37,6	0,658
2	4,75	35,2	25,6	1,2	39	0,93
3	5,53	35,19	25,8	1,54	38,7	1,1184
4	6,37	35,13	27,4	1,94	36,4	1,352
5	6,84	35,07	28,7	2,26	35	1,513
6	7,01	34,9	30	2,5	33,3	1,609
7	4,21	35,15	23,6	0,82	37,1	0,7649
8	4,91	35,02	24,7	1,2	37,1	0,959
9	5,63	35,01	25,6	1,54	36,7	1,139
10	6,46	34,94	26,7	1,94	35,4	1,37
11	6,77	34,56	28,3	2,26	32,9	1,528
12	7,27	34,6	29	2,5	31	1,66
13	4,04	35,43	28,6	0,82	38,6	0,7467
14	5,06	35,37	28,4	1,2	37,8	1,0018
15	6,28	35,31	27,7	1,54	36,5	1,2865
16	6,61	35,23	27,6	1,94	34,3	1,5021
17	7,11	34,94	27,2	2,26	31,7	1,6566
18	7	34,1	27,3	2,5	30	1,7252
19	9,6	40,2	20,8	1	79	2,52
20	12,3	40,3	21	1,5	79	2,83
21	14,3	40,2	21	2	78	3,29
22	9,4	40,1	19,3	1	75	1,73
23	12,2	40,2	19,5	1,5	75	2,14
24	14,3	40,1	19,3	2	74	2,52
Среднее значения	7,395	36,316	25,396	1,658	45,796	1,5646

Применяя регрессионный анализ [9], можно проводить расчеты, позволяющие оценить влияние варьируемых факторов на Δt и выполнить прогнозирование работы малогабаритной пленочной градирни.

Вывод итогов из программы Microsoft Excel приведен на рис. 1.

Вывод итогов								
Регрессионная статистика								
Множественный R		0,9886						
R-квадрат		0,9774						
Нормированный R-квадрат		0,9711						
Стандартная ошибка		0,5230						
Наблюдения		24,0000						
Дисперсионный анализ								
	df	SS	MS	F	Значимость F			
Регрессия	5,0000	212,8256	42,5651	155,6054	3,69689E-14			
Остаток	18,0000	4,9238	0,2735					
Итого	23,0000	217,7494						
	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%	Верхние 95%	Нижние 95,0%	Верхние 95,0%
У-пересечение	-42,566	18,081	-2,354	0,030	-80,554	-4,579	-80,554	-4,579
Переменная X 1	1,482	0,610	2,432	0,026	0,202	2,763	0,202	2,763
Переменная X 2	-0,193	0,086	-2,234	0,038	-0,374	-0,011	-0,374	-0,011
Переменная X 3	2,086	0,535	3,899	0,001	0,962	3,209	0,962	3,209
Переменная X 4	-0,092	0,092	-1,000	0,330	-0,284	0,101	-0,284	0,101
Переменная X 5	1,124	0,683	1,645	0,117	-0,311	2,559	-0,311	2,559

Рис. 1. Вывод итогов в программе Microsoft Excel

Для предварительно выбранных на предыдущем этапе переменных было найдено уравнение линейной множественной регрессии вида:

$$y = -42.566 + 1.4825x_1 - 0.1926x_2 + 2.0855x_3 - 0.0917x_4 + 1.1236x_5. \quad (4)$$

Параметры при x называются коэффициентами «чистой» регрессии. Они характеризуют среднее изменение результата с изменением соответствующего фактора на единицу при неизменном значении других факторов, закрепленных на среднем уровне. В нашем случае видно, что с ростом температуры воды на входе в градирню на 1°C при неизменных других факторах степень охлаждения увеличится на $1,48^\circ\text{C}$, а при повышении температуры наружного воздуха, поступающего на градирню, на 1°C , степень охлаждения снизится на $0,19^\circ\text{C}$; при повышении значения объемного коэффициента массоотдачи на единицу степень охлаждения увеличивается на $1,123^\circ\text{C}$; наиболее значимым фактором на этом этапе является скорость воздуха (x_3).

Уравнение множественной регрессии в естественной форме:

$$\hat{t}_y = \sum_i^n \beta_i \cdot t_{xi},$$

где β_i – стандартизованный коэффициент регрессии.

Стандартизованные коэффициенты регрессии демонстрируют, на сколько единиц в среднем изменится результат при изменении соответствующего фактора x_i на одну единицу, при условии, что средний уровень других факторов не меняется. Поскольку все переменные заданы как центрированные и нормированные, стандартизованные коэффициенты регрессии β_i могут быть сопоставлены между собой [9]. Сравнение этих коэффициентов позволяет ранжировать факторы по степени их влияния на результат. Это является основным преимуществом стандартизованных коэффициентов регрессии по сравнению с коэффициентами «чистой» регрессии, которые не подлежат сравнению.

Теперь рассмотрим уравнение регрессии в стандартизованном формате. На основе естественных коэффициентов регрессии вычислим стандартизированные коэффициенты, используя следующую формулу:

$$\beta_i = b_i \frac{\sigma_{x_i}}{\sigma_y},$$

где σ_{x_i} – среднее квадратическое отклонение для признака x_i ; σ_y – среднее квадратическое отклонение для признака y .

Тогда уравнение будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{t}_y = 1.107t_{x_1} - 0.2142t_{x_2} + 0.3839t_{x_3} - 0.5479t_{x_4} + 0.2476t_{x_5}.$$

Можно отметить, что наибольшее влияние на глубину охлаждения оказывают начальная температура воды, скорость воздуха, относительная влажность; наименьшее влияние оказывает температура воздуха на входе.

Средние показатели эластичности по совокупности демонстрируют, на сколько процентов в среднем изменится результат при изменении соответствующего фактора на 1 %. Эти показатели могут быть сопоставлены друг с другом, что позволяет ранжировать факторы по степени их влияния на результат.

Коэффициент эластичности определяется [9]:

$$\bar{\Theta}_i = b_i \cdot \frac{\bar{x}_i}{\bar{y}_{x_i}},$$

где \bar{x}_i – средние значения x ; \bar{y}_{x_i} – средние значения y .

Получены: $\bar{\Theta}_1 = 7.279$, $\bar{\Theta}_2 = -0.661$, $\bar{\Theta}_3 = 0.467$, $\bar{\Theta}_4 = -0.568$, $\bar{\Theta}_5 = 0.238$. Все коэффициенты, кроме первого, меньше 1.

Фактором, оказывающим наибольшее влияние на результативный признак y , является x_1 , т.е. увеличение температуры воды (от своего среднего значения) на 1 % увеличивает степень охлаждения в среднем на 7,279 %; увеличение температуры воздуха на 1% уменьшит степень охлаждения на 0,661%; увеличение скорости воздуха на 1% увеличивает степень охлаждения в среднем на 0,467%, увеличение относительной влажности на 1% уменьшит степень охлаждения на 0,568 % и увеличение коэффициента массоотдачи на 1 % увеличит степень охлаждения на 0,238 %.

Для оценки качества уравнения регрессии используются парные коэффициенты корреляции:

$$r_{yx_i} = \frac{\text{cov}(y, x_i)}{\sigma_y \cdot \sigma_{x_i}} = \frac{\overline{y \cdot x_i} - \bar{y} \cdot \bar{x}_i}{\sigma_y \cdot \sigma_{x_i}},$$

где σ_y – общая дисперсия результативного признака y ; σ_{x_i} – общая дисперсия i -го фактора.

Используем инструмент «Корреляция» пакета «Анализ данных», который формирует матрицу парных коэффициентов корреляции (таблица 3).

Таблица 3. Матрица парных коэффициентов корреляции

	y	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅
y	1					
x ₁	0,853564389	1				
x ₂	-0,723534583	-0,904039099	1			
x ₃	0,266676666	-0,245193762	0,368907297	1		
x ₄	0,839691698	0,996295501	-0,912331562	-0,267819669	1	
x ₅	0,947859758	0,776893696	-0,604058083	0,349582199	0,773549004	1

Частные коэффициенты корреляции отражают степень связи между результатом и соответствующим фактором при элиминировании (устранении влияния) других факторов, включенных в регрессионное уравнение.

Рассчитанные по рекуррентной формуле частные коэффициенты корреляции варьируются от -1 до $+1$. Сравнение этих коэффициентов позволяет ранжировать факторы по степени их связи с результатом. Частные коэффициенты корреляции дают меру тесноты связи каждого фактора с результатом в чистом виде.

Как видно из таблицы 3, большинство коэффициентов (включая и по модулю), больше $0,6$, т.е. связь заметная. Она наблюдается между: $y-x_1$, $y-x_2$, $y-x_4$; $y-x_5$; x_1-x_2 , x_1-x_4 , x_1-x_5 , x_2-x_4 ; x_2-x_5 , x_4-x_5 , т.е. данные коэффициенты могут быть коллинеарными.

Коэффициенты частной корреляции более высоких порядков можно определить через коэффициенты частной корреляции более низких порядков по рекуррентной формуле:

$$r_{y x_i / x_j} = \frac{r_{y x_i} - r_{y x_j} \cdot r_{x_i x_j}}{\sqrt{(1 - r_{y x_j}^2) \cdot (1 - r_{x_i x_j}^2)}}. \quad (5)$$

Определяем:

$$r_{y x_1 / x_2} = \frac{r_{y x_1} - r_{y x_2} \cdot r_{x_1 x_2}}{\sqrt{(1 - r_{y x_2}^2) \cdot (1 - r_{x_1 x_2}^2)}} = \frac{0,8535 - (-0,7235) \cdot (-0,9040)}{\sqrt{(1 - (-0,7235)^2) \cdot (1 - (-0,9040)^2)}} = \frac{0,1994}{\sqrt{0,476 \cdot 0,1827}} = 0,677.$$

$$r_{y x_1 / x_3} = \frac{r_{y x_1} - r_{y x_3} \cdot r_{x_1 x_3}}{\sqrt{(1 - r_{y x_3}^2) \cdot (1 - r_{x_1 x_3}^2)}} = \frac{0,8535 - (0,2667) \cdot (-0,245)}{\sqrt{(1 - 0,2667^2) \cdot (1 - (-0,245)^2)}} = \frac{0,9188}{\sqrt{0,93 \cdot 0,94}} = 0,987.$$

$$r_{y x_1 / x_4} = \frac{r_{y x_1} - r_{y x_4} \cdot r_{x_1 x_4}}{\sqrt{(1 - r_{y x_4}^2) \cdot (1 - r_{x_1 x_4}^2)}} = \frac{0,8535 - 0,8397 \cdot 0,9929}{\sqrt{(1 - 0,8397^2) \cdot (1 - 0,9929^2)}} = \frac{0,0197}{\sqrt{0,294 \cdot 0,014}} = 0,363.$$

Аналогично по формуле (5) находим остальные коэффициенты частной корреляции. Полученные данные свидетельствуют, что теснота связи факторов в большинстве случаев варьирует от «заметной связи» до «высокой».

Границы изменения индекса множественной корреляции от 0 до 1 . Чем ближе его значение к 1 , тем теснее связь результативного признака со всем набором исследуемых факторов. В нашем случае коэффициент множественной корреляции $R = 0,98862$ (рис. 1), что указывает на достаточно сильную связь.

Нескорректированный коэффициент множественной детерминации $R^2 = 0,977$, что говорит о том, что $97,7\%$ вариации результата объясняется вариацией представленных в уравнении факторов.

Для предотвращения возможного преувеличения тесноты связи, используется скорректированный индекс (коэффициент) множественной корреляции. Величину скорректированного индекса детерминации можно представить следующей формулой [9]:

$$R_{\text{скаорр}}^2 = 1 - (1 - R^2) \cdot \frac{(n-1)}{(n-m-1)},$$

где $m = 5$ – число параметров при переменных x ; $n = 24$ – число наблюдений:

$$R_{\text{скаорр}}^2 = 1 - (1 - 0,977) \cdot \frac{(24-1)}{(24-5-1)} = 0,9706.$$

Значимость уравнения множественной регрессии в целом, так же, как и в парной регрессии, оценивается с помощью F – критерия Фишера:

$$F_{\text{факт}} = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{n-m-1}{m},$$

$$F_{\text{факт}} = \frac{0,977}{1-0,977} \cdot \frac{24-5-1}{5} = 152,92.$$

Близкое значение получено и в поле « F » дисперсионного анализа.

Табличное значение критерия при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $k_1 = m = 5$, $k_2 = n - m - 1 = 24 - 5 - 1 = 18$: $F_{\text{табл}} = F(0,05; 5; 18) = 2,77$ [9].

Видно, что $F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}}$, значит полученное уравнение корреляции является статистически значимым.

Выявив целесообразность включения в уравнение множественной регрессии каждого фактора после остальных факторов. Мерой для оценки включения фактора в модель служит частный F – критерий, т.е. F_{xi} .

Частный F – критерий построен на сравнении прироста факторной дисперсии, обусловленного влиянием дополнительно включенного фактора, с остаточной дисперсией на одну степень свободы по регрессионной модели в целом.

$$F_{xi} = \frac{R_{yx_1 \dots x_i \dots x_m}^2 - R_{yx_1 \dots x_{i-1} x_{i+1} \dots x_m}^2}{1 - R_{yx_1 \dots x_i \dots x_m}^2} \cdot (n - m - 1),$$

где $R_{yx_1 \dots x_i \dots x_m}^2$ – коэффициент множественной детерминации для модели с полным набором факторов, $R_{yx_1 \dots x_{i-1} x_{i+1} \dots x_m}^2$ – тот же показатель, но без включения в модель фактора x_i ; n – число наблюдений; m – число параметров в модели (без свободного члена).

Если фактическое значение F_{xi} превышает $F_{\text{табл}} = F(\alpha; k_1; k_2)$, то дополнительное включение фактора x_i в модель статистически оправданно и коэффициент чистой регрессии b_i при факторе x_i статистически значим. Если же фактическое значение F_{xi} меньше табличного, то дополнительное включение в модель фактора x_i не увеличивает существенно долю объясненной вариации признака y , следовательно, нецелесообразно его включение в модель; коэффициент регрессии при данном факторе в этом случае статистически незначим.

Как видим, чтобы воспользоваться данной формулой, необходимы матрица межфакторной корреляции и расчет по ней соответствующих коэффициентов детерминации. Полученные по расчетам данные приведены в таблице 4.

Таблица 4. Расчетные значения межфакторных коэффициентов детерминации для оценки значимости каждого фактора

Межфакторный коэффициент детерминации, $R^2_{yx_1 \dots x_{i-1} x_{i+1} \dots x_m}$	Частный F_{xi} – критерий Фишера	Критерий Фишера табличный $F_{табл}$	Оценка фактора значимый/ незначимый
$R^2(x_2, x_3, x_4, x_5) = 0,0319$	739,62	2,93	фактор x_1 значимый
$R^2(x_1, x_3, x_4, x_5) = 0,822$	121,3	2,93	фактор x_2 значимый
$R^2(x_1, x_2, x_4, x_5) = 0,875$	79,83	2,93	фактор x_3 значимый
$R^2(x_1, x_2, x_3, x_5) = 0,9437$	26,6	2,93	фактор x_4 значимый
$R^2(x_1, x_2, x_3, x_4) = 0,7426$	183,4	2,93	фактор x_5 значимый

Как видно из таблицы 4, все факторы значимы, значит уравнение множественной линейной регрессии сохраняет вид, представленный формулой (4).

Вывод. В работе получена и обоснована линейная модель множественной регрессии, из которой следует, наиболее значимые факторы, влияющие на степень охлаждения воды в пленочной градирне, это температура воды на входе в градирню, скорость воздуха и объемный коэффициент массоотдачи, который определяется конкретным типом оросителя. Полученные на основании экспериментальных данных регрессионные уравнения обладают высокой точностью. Они позволят при первоначальном подборе или модернизации вентиляторной пленочной градирни прогнозировать параметры ее работы в конкретных условиях с определенным оросителем, что в итоге будет способствовать сохранению качества продукции и/или стабильной работе технологических установок, использующих оборотную воду.

В дальнейшем планируется рассмотреть возможность оптимизации процесса теплообмена в пленочной малогабаритной градирне эксергетическим пинч-анализом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Карнаух, В. В. Совершенствование процессов охлаждения оборотной воды и использования ее теплоты на предприятиях пищевых производств / В. В. Карнаух, А. Б. Бирюков. – Вологда, Москва : ООО «Инфра-Инженерия», 2025. – 259 с. – ISBN 978-5-9729-2148-5.
- Карнаух, В. В. Особенности гидродинамики в теплообменных аппаратах с насадочным слоем для охлаждения воды / В. В. Карнаух, М. А. Пундик // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2018. – № 4. – С. 57-65. EDN YAABNA.
- Крюков, О. В. Повышение энергоэффективности водооборотных систем предприятий при оптимизации управления градирнями / О. В. Крюков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2016. – № 19. – С. 5-27. – EDN WMQNWТ.
- Карнаух, В. В. Технологии оборотного водоснабжения предприятий пищевых производств: анализ состояния и пути совершенствования / В. В. Карнаух // Вестник Московского энергетического института. – 2025. – № 1. – С. 54-66. – DOI 10.24160/1993-6982-2025-1-54-66. – EDN LKBZUP.
- Контактные насадки промышленных теплообменных аппаратов: монография / А. М. Каган, А. Г. Лаптев, А. С. Пушнов, М. И. Фарахов. – Казань: Отечество, 2013. – 454 с.
- Пономаренко, В. С. Градирни промышленных и энергетических предприятий: Справочное пособие / В. С. Пономаренко, Ю. И. Арефьев. – М.: Энергоатомиздат: 1998. – 376 с.

7. Беренгартен, М. Г. Контактные устройства для градирен : Учебное пособие / М. Г. Беренгартен, М. Г. Лагуткин. – Москва : федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», 2023. – 132 с. – ISBN 978-5-276-02790-6. – EDN VFVCOT.
8. Столярова, Е. Ю. Повышение тепловой эффективности охлаждения воды в пленочной градирне с комбинированными блоками оросителей: дис. ... канд. техн. наук: 2.4.6 / Столярова Екатерина Юрьевна ; Казан. гос. энерг. университет. – Казань, 2024. – 194 с.
9. Чалганова, А. А. Построение множественной регрессии и оценка качества модели с использованием табличного процессора Excel: учебное пособие по дисциплине «Эконометрика» / А. А. Чалганова ; Российский государственный гидрометеорологический университет. – Санкт-Петербург : Российский государственный гидрометеорологический университет, 2022. – 90 с. – EDN BVEKEO.

Поступила в редакцию 23.05.2025 г., рекомендована к печати 10.06.2025 г.

AN APPLICATION OF REGRESSION ANALYSIS TO PREDICT THE PERFORMANCE OF A SMALL-SIZE FILM COOLING TOWER

Karnaukh V.V., Biriukov A.B., Paniuzhev A.A.

The article discusses the issue of predicting the operation of a small-size film cooling tower used for cooling the recycled water of an industrial enterprise. An assessment of the significance of the influence of meteorological, technological, and structural parameters on the water cooling degree was carried out using multifactorial regression models. The analysis of the results showed that the most significant factors affecting on the water cooling degree in the small-size film cooling tower are the inlet water temperature, air velocity, and volumetric mass transfer coefficient, which is determined by the specific type of nozzle.

Keywords: recycled water water, film cooling tower, nozzle, evaporative cooling, water cooling degree, regression analysis.

Карнаух Виктория Викторовна

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры холодильной и торговой техники имени Осокина В.В. ФГБОУ ВО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк; профессор кафедры промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Российская Федерация, г. Самара.
E-mail: karnaukh.vita0629@gmail.com

Karnaukh Viktoriia Viktorovna

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at Department of Refrigerating and Trade Equipment Department of Tugan-Baranovskogo Donetsk National University of Economics and Trade, Russian Federation, DPR, Donetsk; Professor at Department of Industrial Heat Power Engineering of Samara State Technical University, Russian Federation, Samara.

Бирюков Алексей Борисович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической теплофизики, проректор ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: birukov.ttf@gmail.com

Biriukov Aleksei Borisovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technical Thermophysics, Vice-rector of Donetsk National Technical University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

Панюжев Андрей Алексеевич

аспирант ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Российская Федерация, г. Самара.
E-mail: cbhbec.cbh@gmail.com

Paniuzhev Andrei Alekseevich

Postgraduate Student of Samara State Technical University, Russian Federation, Samara.

ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

© 2025 *Миханошин В.В., Бурков А.Ф.*

Условия эксплуатации судового электрооборудования (ЭО) являются достаточно специфическими, а судовые возможности выполнения необходимых ремонтных работ по его восстановлению или замене во многих случаях крайне ограничены. Поэтому актуальными являются вопросы, связанные с повышением надёжности ЭО, и в частности, электроприводов (ЭП), являющихся основными приёмниками электрической энергии (ЭЭ). В статье рассмотрен способ повышения надёжности электрических машин (ЭМ), основанный на их выполнении с несколькими статорно-роторными парами, встроенными друг в друга, позволяющий снизить риски аварийных ситуаций ЭО. А также приведено описание устройства для повышения энергоэффективности асинхронного электропривода.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, надёжность, электрическая машина, электрический привод, электрическое оборудование, электрическая энергия.

Введение. Необходимость повышения надёжности судового ЭО обусловлена специфическими условиями его эксплуатации (изменениями температуры в широком диапазоне, повышенной влажностью воздуха, агрессивностью окружающей среды и пр.), и активно отражена в действующих нормативных документах, к основным из которых относится «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года», утвержденная распоряжением Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р, и «Стратегия развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года», утвержденная распоряжением Правительства РФ от 08.12.2010 № 2205-р.

Режимы и условия эксплуатации современных ЭП определяются их назначением и отличаются большим многообразием. К основным режимам работы исполнительных и приводных двигателей ЭП относятся режимы, близкие к S1, S2 и S3, наиболее напряженным из которых являются режимы, близкие к S3. Исходя из условий эксплуатации, в настоящее время промышленностью для ЭП освоен выпуск ЭД различных категорий исполнения, предназначенных для эксплуатации в разных климатических условиях, основными из которых являются категории ТВ, ТС, У, ХЛ и др.

Выполненный анализ опыта технической эксплуатации судового ЭО [1, 2] показывает, что несмотря на свое конструктивное совершенствование и разнообразие, выходы из строя ЭМ [3] современных ЭП, содержащих достаточно развитые системы управления, контроля и защиты, не являются единичными.

Отказы судовых ЭМ (генераторов или электродвигателей (ЭД)) могут привести к нарушениям необходимой управляемости судна, сохранности перевозимых грузов и другим отклонениям от нормальных функционирований судов, и как следствие, к дополнительным, порой значительным, финансовым затратам.

Диагностика, поиск и устранение неисправностей асинхронных ЭП, наиболее широко используемых в настоящее время, широко освещены в отечественных и зарубежных научно-технических публикациях [4–8]. Вопросы, связанные с повышением надёжности судового ЭО, включая ЭП, рассматриваются в научно-технической и учебной литературе ряда отечественных [2, 9–12] и зарубежных [13, 14] изданий.

Основная часть. Анализ литературы позволяет сделать вывод о том, что большинство известных научно-технических решений и способов, направленных на повышение надёжности судовых ЭМ, основано на совершенствовании их систем управления, контроля и защит. При этом несмотря на то, что отказы ЭМ, большинство из которых связано с электрическими повреждениями их статорных обмоток, составляют до 95 % случаев [15], вопросы конструктивных изменений ЭМ в литературных источниках практически не рассматриваются. Кажущееся очевидным решение предотвращения таких отказов заключается в непрерывном контроле сопротивления изоляции судовых электроэнергетических систем, включая обмотки работающих ЭМ.

Исходя из того, что сопротивление изоляции судового ЭО зависит от числа и единичных мощностей подключенных в каждый момент времени потребителей ЭЭ, использование этого метода в судовой электротехнике для ЭМ не представляется достаточно эффективным, как и установка мегомметров на отдельные ЭМ с непрерывным дистанционным отслеживанием сопротивления изоляции.

ЭМ (исполнительные или приводные ЭД) являются основными компонентами силовых каналов ЭП, и решение частных задач, направленных на повышение надёжности судовых ЭП, может быть обеспечено за счет использования в них трёхфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (АКЗ) с несколькими статорно-роторными парами [16]. Такой АКЗ содержит статор, выполненный из нескольких полых сердечников - магнитопроводов (1) уменьшающегося диаметра, как элементов соответствующих статорно – роторных пар (рис. 1).

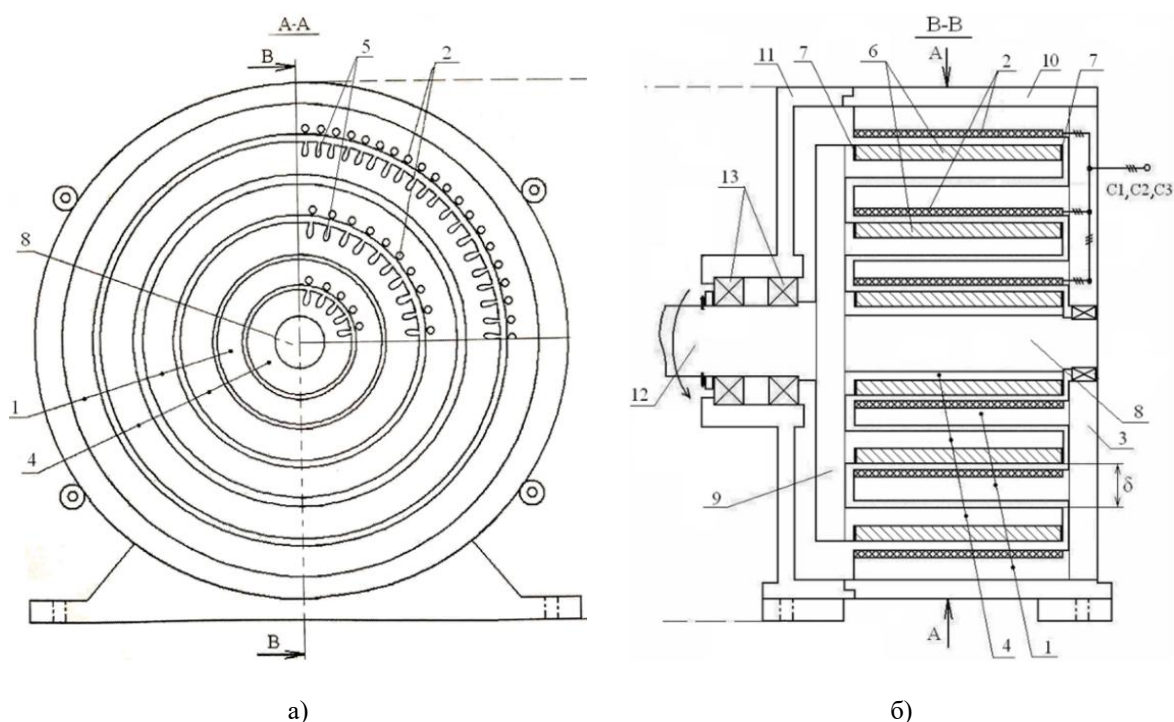


Рис. 1. Предложенный трёхфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором:
а) поперечное сечение (вид с торца), б) продольное сечение (схематический вид):

- 1 – сердечники – магнитопроводы статора, 2 – трёхфазные обмотки, 3 – опорное статорное кольцо, 4 – сердечники – магнитопроводы ротора, 5 – полузакрытые пазы, 6 – короткозамкнутая обмотка типа "беличья клетка", 7 – короткозамыкающие кольца, 8 – центральный стержень, 9 – опорное роторное кольцо, 10 и 11 – защитные крышки, 12 – приводной вал, 13 – подшипники скольжения

Число зубцов и пазов в каждом данном сердечнике - магнитопроводе (1) между собой одинаково. В пазы каждого данного сердечника - магнитопровода (1) уложена отдельная трехфазная обмотка (2). Каждая из этих обмоток соединена в схему «звезда» (рис. 2), а их выводы соединены параллельно пофазно и выведены в клеммную коробку. Т.к. число витков всех фазных медных обмоток одинаково между собой, то по мере уменьшения диаметра сердечников уменьшен, соответственно, и диаметр трёхфазной обмотки (2).

Ротор статорно – роторных пар аналогично статору и состоит из стольких же, уменьшающимся диаметром, сердечников - магнитопроводов (4) (рис.1), как элемента соответствующей статорно – роторной пары. Сердечники - магнитопроводы (1) статора и сердечники - магнитопроводы (4) ротора являются шихтованными, причем последние выполнены с полузакрытыми пазами (5) с внешней их стороны.

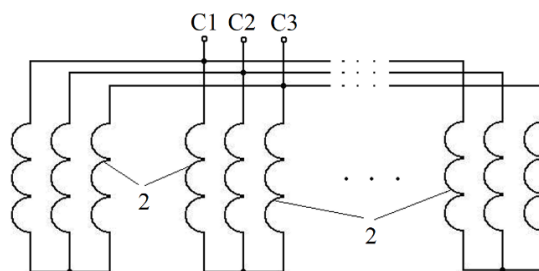


Рис. 2. Схема соединений трехфазных обмоток сердечников - магнитопроводов

В данных пазах расположена короткозамкнутая медная или алюминиевая обмотка (6) типа "беличья клетка". Стержни этой обмотки замкнуты по обоим торцам накоротко кольцами (7) из такого же материала (рис.1 б). Наименьший по диаметру сердечник - магнитопровод (4) ротора установлен на валу (8), а все сердечники ротора большего диаметра прилегают по внутренним торцам к опорному роторному кольцу (9) (рис. 1 б). Для защиты от воздействия окружающей среды сердечников – магнитопроводов (1) и (4) служат защитные крышки (10) и (11), плотно соединенные между собой по ступенчатому профилю. Причем крышка (11) сопряжена подвижно с приводным валом (12) АКЗ посредством подшипников скольжения (13), сопряженным в свою очередь с кольцом (9). Охлаждение обмоток АКЗ может быть воздушным. Для отвода тепла от внутреннего пространства предусматриваются сквозные технологические отверстия в защитных крышках, а опорное статорное кольцо выполняют ребристым с внешней стороны.

Предложенный АКЗ, защищенный патентом на изобретение, конструктивно целесообразно выполнять большего диаметра и относительно коротким, т.к. при этом обеспечивается большая его надёжность и удобство размещения обмоток на сердечниках - магнитопроводах.

Принцип действия данного АКЗ такой же, как и обычного трехфазного двигателя, но благодаря тому, при подключении обмотки (2) к трёхфазной сети переменного тока электромагнитным образом через воздушные зазоры одновременно взаимодействует несколько статорно-роторных пар, т.е. каждый соответствующий сердечник - магнитопровод (1) статора взаимодействует с соответствующим сердечником - магнитопроводом (4) ротора, удельная мощность его оказывается значительно выше. А внутреннее его пространство используется при этом более эффективно.

Надёжность двигателя также является более высокой, так как при отказе одной или нескольких его обмоток он сохранит свою работоспособность, хоть и будет развивать меньший электромагнитный момент. Вышедшую из строя обмотку при этом отключают.

Оценить изменение допустимой частоты вращения при изменении размеров АКЗ можно следующим образом. В соответствии с законом квадрата куба, при изменении всех размеров ЭМ в a раз электрическая мощность изменится в a^4 раз:

$$P_{эм}^* = k_1 \left(\frac{a}{a_{исх}} \right)^4 = k_1 a^{*4}, \quad (1)$$

где $a_{исх}$ – исходный (первоначальный) размер ЭМ, k_1 – коэффициент пропорциональности.

Зависимости потребляемой мощности наиболее типовых судовых механизмов от частоты вращения имеют вид:

а) для грузоподъёмных механизмов

$$P_{c1}^* = \frac{P}{P_{с.н}} = k_2 \left(\frac{n}{n_n} \right) = k_2 n^*; \quad (2)$$

б) для механизмов с вентиляторной нагрузкой (центробежных насосов, вентиляторов, гребных винтов)

$$P_{c2}^* = \frac{P}{P_{с.н}} = k_3 \left(\frac{n}{n_n} \right)^3 = k_3 n^{*3}, \quad (3)$$

где k_1, k_2, k_3 – коэффициенты пропорциональности.

Приравняв (2) и (3) к (1) и выразив частоты вращения, соответственно получим:

$$P_{эм}^* = P_{c1}^* \Rightarrow k_1 a^{*4} = k_2 n^* \Rightarrow n^* = \frac{k_1 a^{*4}}{k_2}, \quad (4)$$

$$P_{эм}^* = P_{c2}^* \Rightarrow k_1 a^{*4} = k_3 n^{*3} \Rightarrow n^* = \sqrt[3]{\frac{k_1 a^{*4}}{k_3}}, \quad (5)$$

На рис. 3 по выражениям (4) и (5) построены зависимости относительной частоты вращения n^* от размера a ЭМ:

$$P_{эм}^* = P_{c1}^* \Rightarrow k_1 a^{*4} = k_2 n^* \Rightarrow n^* = \frac{k_1 a^{*4}}{k_2}, \quad (4)$$

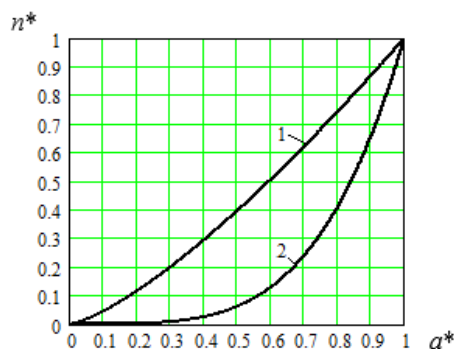


Рис. 3. Зависимость частоты вращения от размера a ЭМ: 1 – по выражению (5), 2 – по выражению (4)

Из рис. 3 видно, что предложенный АКЗ целесообразно применять в ЭП, которые работают с вентиляторным моментом нагрузки на валу, т.к. в этом случае частота вращения при снижении размера АКЗ оказывается бóльшей.

Целесообразно применение таких АКЗ в ЭП, режим работы которых длительный с переменной во времени нагрузкой, вплоть до холостого хода (компрессоры, рулевые устройства и т.д.). Использование разработанного АКЗ с несколькими статорно-роторными парами целесообразно совместно с предложенным авторами недорогим устройством, также защищенном патентом на изобретение (рис. 4) [17]. Данное устройство автоматически подключает по сигналу датчика тока и / или измерителя коэффициента мощности ту обмотку АКЗ, при работе которой будет обеспечен близкий к номинальному коэффициент его загрузки k_3 . При этом появляется возможность устранить еще один из существенных недостатков асинхронных двигателей – снижение коэффициента мощности при малой их нагрузке. Учитывая тот факт, что на судах имеется ряд электроприводов, которые значительную долю от общего рабочего времени работают с низким k_3 , то применение предложенного АКЗ в них с подключаемыми трехфазными обмотками в функции k_3 позволит улучшить энергетические показатели судовой сети: увеличить коэффициент мощности $\cos\varphi$ и снизить потери в ней. Что приведет, в свою очередь, к некоторому увеличению её пропускной способности. На рис. 4 приведена схема устройства с предложенным АКЗ с тремя парами сердечников – магнитопроводов, и соответственно, с тремя трехфазными обмотками статора.

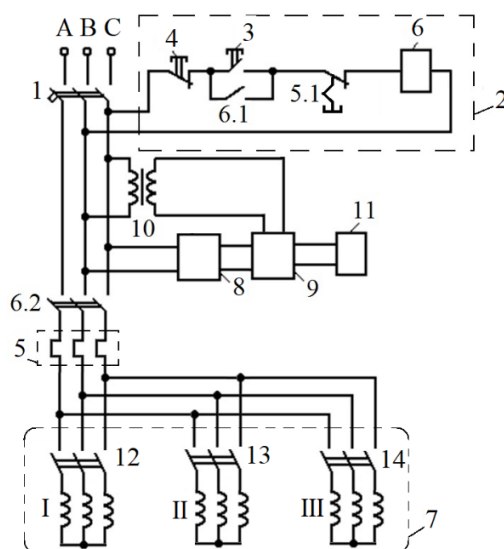


Рис. 4 – Устройство повышения энергоэффективности асинхронного электропривода:

- 1 – Автоматический выключатель; 2 – магнитный пускатель; 3 – кнопка пуск; 4 – кнопка стоп;
 5 – реле тепловой защиты; 5,1 – контакт теплового реле; 6 – катушка магнитного пускателя (МП);
 6,1 – блок-контакт МП; 6,2 – главные контакты МП; 7 – АКЗ; 8 – фазометр; 9 – контроллер (схема управления); 10 – трансформатор напряжения; 11 – коммутационное устройство (КУ);
 12, 13, 14 – контакты КУ; I, II, III – обмотки АКЗ

Тепловую защиту такого АКЗ целесообразно выполнить на основе термочувствительных элементов – позисторов – полупроводниковых резисторов, сопротивление которых зависит от температуры, встраиваемых в лобовой части трехфазной обмотки I, II и III каждого сердечника - магнитопровода статора. В этом случае в устройство на рис. 4 включают реле термисторной защиты, например типа РТ-М01-1-15.

Работа данного устройства заключается в следующем. При замыкании автоматического выключателя (1) и нажатии кнопки пуск (3) катушка (6) МП (2) получает питание. Блок-контакт (6.1) МП (2) при этом шунтирует кнопку пуск (3), после чего её можно отпустить, а главные его контакты (6.2) замыкаются, подключая обмотку статора АКЗ (7) к сети. При включении АКЗ (7) в сеть КУ подключает обмотку наибольшего по размеру сердечника – магнитопровода статора – I, замыкая контакты (12). Ротор АКЗ (7) разгоняется до номинальной частоты вращения. После окончания переходного процесса схема управления (9) начинает сравнивать текущий $\cos\varphi$, измеренный с помощью фазометра (8), и/или ток, измеренный с помощью датчика тока (не показан), с заданными заранее в его памяти верхним и нижним пороговыми значениями $\cos\varphi$, и, соответственно, с верхним и нижним пороговыми значениями тока. При номинальных значениях $\cos\varphi$ (тока) двигатель продолжит работать на обмотке I. При некоторых средних значениях этих величин КУ (11) по сигналу управления от контроллера (схемы управления) (9) подключает отключает обмотку I и включает обмотку II. Контакты (12) при этом будут разомкнуты, а контакты (13) замкнуты. При работе двигателя в режимах, близких к холостому ходу, КУ (11) по сигналу управления от контроллера (схемы управления) (9) отключает обмотку II (или I) и включает обмотку III. Контакты (13) (или 12) при этом будут разомкнуты, а контакты (14) замкнуты.

При частых изменениях нагрузки и, соответственно, частых коммутациях контактов 12, 13 и 14 последние будут относительно быстро изнашиваться и требовать обслуживания и / или замены. Вероятность отказа ЭП при этом возрастает. Повышение надежности ЭП в этом случае может быть обеспечено путем установки вместо этих контактов твердотельных реле (solid state relay (SSR)) с технологией zero-crossing (переключение через нулевую точку) (называемой иногда также технологией синхронной коммутации "zero sync"). Применение таких реле позволит получить следующие известные преимущества: бесшумность в работе, большая скорость переключения, длительный срок службы благодаря отсутствию электрического и механического износа, а также меньшей чувствительности к вибрациям, влажности и запыленности окружающего воздуха; снижение броска тока при включении, и соответственно, снижение уровня создаваемых электромагнитных помех. Последние два преимущества – снижение броска тока и уровня создаваемых электромагнитных помех при включении обеспечивается благодаря тому, что силовые полупроводниковые ключи (например тиристоры) этих реле начинают проводить ток (т.е. включаются) тогда, когда кривая напряжения пересекает ноль. А перестают проводить ток (выключаются) тогда, когда кривая тока пересекает ноль.

Стоимость составляющих предложенного электропривода – АКЗ с несколькими статорно-роторными парами, твердотельных реле, фазометра и контроллера (схемы управления), очевидно больше суммарной стоимости нерегулируемого электропривода с магнитным пускателем и с обычным асинхронным двигателем, но не превышает стоимости частотно регулируемого асинхронного электропривода с полупроводниковым частотным преобразователем. Однако учитывая продолжительный срок эксплуатации, порядка 15...20 лет, возможность, пусть в ограниченном диапазоне и ступенчато, регулировать мощность АКЗ, а также возможность работы в режиме близком к номинальному с высоким коэффициентом полезного действия и с высоким коэффициентом мощности, можно сделать вывод об окупаемости данного ЭП и целесообразности его применения.

Выводы. Таким образом, электропривод, выполненный на основе предложенного АКЗ, характеризуется рядом преимуществ по сравнению с ЭП, выполненном с обычным асинхронным двигателем. При этом свойственные последнему внезапные отказы, обусловленные электрическими неисправностями, и характеризующиеся скачкообразным переходом из работоспособного состояния в неработоспособное, у предложенного АКЗ отсутствуют благодаря наличию нескольких обмоток, расположенных на отдельных сердечниках - магнитопроводах статора. Поэтому выход одной из таких обмоток из строя практически не оказывает заметного влияния на работу остальных обмоток в отличие от многоскоростных АКЗ, у которых в одних и тех же пазах укладывается две или более обмоток и перегрев одной из них приводит к быстрому перегреву соседней обмотки. А благодаря высокому быстродействию современных электронных контроллеров (схем управления) и твердотельных реле (solid state relay (SSR)) с технологией zero-crossing обеспечивается быстрый (практически мгновенный) переход работы с одной обмотки на другую.

Несмотря на ступенчатость регулирования мощности ЭП с данным АКЗ могут быть также рекомендованы к применению в механизмах непрерывного транспорта – вентиляторах, насосах, конвейерах, производящих перемещение газообразных, жидких или твердых грузов с постоянной скоростью независимо от степени их загрузки. При частичной нагрузке данных механизмов их ЭП, работающие с постоянной скоростью, характеризуются повышенным удельным расходом ЭЭ на единицу выполненной полезной работы. Применение в них предложенного устройства с АКЗ с несколькими статорно-роторными парами позволит выполнить ту же работу с меньшим расходом ЭЭ.

Электроприводы, выполненные на основе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, как основные потребители ЭЭ на судах могут быть модернизированы. При несколько большей стоимости предложенный ЭП характеризуется большей надежностью, способностью автоматического регулирования мощности на валу, высокими энергетическими показателями при работе в долевых режимах, а также большей удельной мощностью.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бурков, А. Ф. Повышение эффективности технической эксплуатации судовых электроприводов / А. Ф. Бурков. – Владивосток : Мор. гос. ун-т им. адм. Г. И. Невельского, 2011. – 417 с.
2. Бурков, А. Ф. Надежность судовых электроприводов / А. Ф. Бурков. – Владивосток : Дальневост. федерал. ун-т, 2014. – 204 с.
3. Кацман, М. М. Электрические машины. Справочник: учебное пособие / М. М. Кацман. – Изд-во КноРус. – 2023. – 480 с.
4. Пантина, А. И. Контроль технического состояния судовых асинхронных двигателей на основе характеристик внешнего электромагнитного поля / А. И. Пантина, О. А. Белов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2017. – Т. 13, № 1. – С. 32-36. – EDN ZEHQDT.
5. Beley, V. F. Results of studies of higher harmonics during the operation of ship frequency-controlled asynchronous electric drives / V. F. Beley, K. V. Korotkikh, N. Ya. Sinyavskij // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies. – 2023. – No. 4. – P. 80-87. – DOI 10.24143/2073-1574-2023-4-80-87. – EDN KBKAVU.
6. Integrated machine learning and probabilistic degradation approach for vessel electric motor prognostics / J. I. Aizpurua, K. E. Knutsen, M. Heimdal, E. Vanem // Ocean Engineering. – 2023. – Vol. 275. – P. 114153. – DOI 10.1016/j.oceaneng.2023.114153. – EDN MKHFST.
7. Velasco-Gallego, Ch. RADIS: A real-time anomaly detection intelligent system for fault diagnosis of marine machinery / Ch. Velasco-Gallego, I. Lazakis // Expert Systems with Applications. – 2022. – Vol. 204. – P. 117634. – DOI 10.1016/j.eswa.2022.117634. – EDN JGLIEK.
8. Cardoso, A. J. M. Diagnosis and Fault Tolerance of Electrical Machines / A. J. M. Cardoso. – The Institution of Engineering and Technology, 2018. – 376 p.

9. Бурков, А. Ф. Теоретические положения технической эксплуатации для определения надежности судовых электроприводов / А. Ф. Бурков, В. Х. Нгуен // Надежность и безопасность энергетики. – 2023. – Т. 16, № 3. – С. 184-191. – DOI 10.24223/1999-5555-2023-16-3-184-191. – EDN MBZQJE.
10. Белов, О. А. Внедрение комплексной защиты судовых асинхронных электроприводов / О. А. Белов, Г. С. Мясников // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития : мат. Второй МНТК (23–25 октября 2019 г.). – Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ, 2020. – С. 73-76.
11. Олейников, А. М. Судовые электрические машины и их эксплуатация / А. М. Олейников, В. Н. Мартынов. – Севастополь : СевНТУ, 2013. – 376 с.
12. Гольдберг, О. Д. Надёжность электрических машин / О. Д. Гольдберг, С. П. Хелемская. – М. : Академия, 2010. – 288 с.
13. Daya, A. A. Systems Reliability and Data Driven Analysis for Marine Machinery Maintenance Planning and Decision Making / A. A. Daya, I. Lazakis // Machines. – 2024. – Vol. 12, No. 5. – P. 294. – DOI 10.3390/machines12050294. – EDN TRNSOR.
14. Kantharia R. A Guide to Ship's Electro-Technology: Part 1. For Marine Engineers and Electrical Officers / R. Kantharia. – Marine Insight, 2013. – 44 p.
15. Воробьёв, В. Е. Прогнозирование срока службы электрических машин / В. Е. Воробьёв, В. Я. Кучер. – СПб.: СЗТУ, 2004. – 56 с.
16. Патент № 2759161 С2 Российская Федерация, МПК H02K 17/16, H02K 16/02, H02K 16/04. асинхронный трехфазный электродвигатель : № 2018120069 : заявл. 30.05.2018 : опубл. 09.11.2021 / В. В. Миханович ; заявитель ФГБОУ ВО "Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского".
17. Патент № 2748215 С1 Российская Федерация, МПК H02P 1/32, H02P 25/18, H02P 23/02. Устройство для повышения энергоэффективности асинхронного электропривода : заявл. 12.10.2020 : опубл. 21.05.2021 / В. В. Миханович, А. Ф. Бурков ; заявитель ФГБОУ ВО "Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского".

Поступила в редакцию 26.05.2025 г., рекомендована к печати 16.06.2025 г.

IMPROVING THE RELIABILITY OF MARINE ELECTRIC DRIVES

Mikhanoshin V.V., Burkov A.F.

The operating conditions of marine electrical equipment are quite specific, and the ship's ability to perform the necessary repair work to restore or replace it is in many cases extremely limited. The analysis of the ship's electrical equipment operation experience allows us to conclude that failures of electrical machines are not isolated during operation, but their causes and consequences are diverse. Therefore, issues related to improving the reliability of electrical equipment, and in particular, electric drives, which are the main receivers of electrical energy, are relevant. The article suggests a way to increase the reliability of electric machines based on their implementation with several stator-rotor pairs integrated into each other, which reduces the risks of electrical emergencies.

Keywords: asynchronous motor, reliability, electric machine, electric drive, electrical equipment, electric energy.

Миханович Виктор Викторович

кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования и автоматики судов ФГБОУ ВО «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского», Российская Федерация, г. Владивосток.
E-mail: tetrodoksin@mail.ru

Mikhanoshin Viktor Viktorovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Equipment and Automation of Ships of Admiral G.I. Nevelsky Maritime State University, Russian Federation, Vladivostok.

Бурков Алексей Фёдорович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электрооборудования и автоматики судов ФГБОУ ВО «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского», Российская Федерация, г. Владивосток.
E-mail: burkov.22@mail.ru

Burkov Aleksei Fedorovich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at Department of Electrical Equipment and Automation of Ships of Admiral G.I. Nevelsky Maritime State University, Russian Federation, Vladivostok.

ПАРЕТО-АНАЛИЗ КОНТУРА РЕГАЗИФИКАЦИИ КРИОГЕННОЙ СИСТЕМЫ АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ, РАБОТАЮЩЕЙ ПО ЦИКЛУ РЕНКИНА С РЕГЕНЕРАЦИЕЙ ТЕПЛА

© 2025 Шиманова А.Б., Пулькина А.Ю., Галкина Н.В., Карнаух В.В., Сармин Д.В.

Исследование посвящено оптимизации контура регазификации криогенной системы аккумулирования энергии, работающей по циклу Ренкина с регенерацией. На основе термодинамического и эксергетического анализа определена оптимальная конфигурация контура регазификации с воздухом в качестве рабочего тела. Проведена оценка эффективности цикла Ренкина с регенерацией тепла, по которому осуществляется работа контура регазификации, и его экономической рентабельности. С помощью метода Парето-анализа были выявлены наиболее эффективные рабочие тела – метан, R14, R116, причем контур регазификации на метане демонстрирует максимальную мощность, а на R14 и R116 – лучшую рентабельность. Установлено, что основные потери эксергии сосредоточены в конденсаторе, что указывает на ключевое направление для дальнейшего повышения КПД системы.

Ключевые слова: регазификатор воздуха, цикл Ренкина, энтропия, КПД, криогенный баллон, эксергия.

Введение. В современных энергетических установках цикл Ренкина нашел широкое применение, что обусловлено его высокой эффективностью и универсальностью в применении. В этой связи вопросы оптимизации термодинамических параметров цикла Ренкина и экономической оценки его эффективности представляют собой ключевые задачи для исследователей и инженеров. Следует также отметить, что детальный анализ существующих энергетических систем и установок является необходимым условием для их дальнейшего перепроектирования и оптимизации с целью повышения общей производительности и снижения эксплуатационных затрат.

В рамках современных научных исследований, представленных в работах [1-3], активно разрабатываются инновационные подходы к использованию низкопотенциальной энергии сжиженного природного газа (СПГ). В цикле используется основное устройство — многопоточный криогенный теплообменник (MSCHE), который уменьшает разницу температур в процессе теплопередачи и повышает энергоэффективность. Двухступенчатое расширение означает наличие двух процессов испарения, которые происходят при температуре около $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. Это позволяет более эффективно использовать холодную энергию СПГ [1]. Эти разработки, характеризующиеся высокой степенью научной проработки и практической значимости, открывают новые перспективы в области энергоэффективности и устойчивого развития. Эксергетический анализ, с оценкой потерь в определенных узлах установок, работающих по циклу Ренкина, рассмотрены в работах [4-6]. В [5] результаты оптимизации показывают, что общая выработка энергии, эффективность использования эксергии составляют 90,65 МВт и 41,38 % соответственно.

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

В работах [6-13] рассматриваются вопросы, связанные с разработкой концепции и анализом эффективности комбинированных процессов хранения криогенной энергии и регазификации сжиженного природного газа, и оцениваются преимущества комбинированной системы хранения криогенной энергии - LNG-CES, работающей по циклу Ренкина. Термодинамический анализ предлагаемого процесса проводится в три этапа потока эксергии: этап регазификации СПГ, этап сжижения воздуха и этап расширения воздуха. Кроме того, предлагаемая система может одновременно накапливать и высвобождать энергию. Таким образом, количество энергии, вырабатываемой системой CES, более чем в два раза превышает показатели последних разработок, в которых используются отдельные режимы работы для хранения и высвобождения энергии [6, 7]. В [11] рассматривается анализ эксергии сверхкритического энергетического цикла CO_2 , использующего геотермальную энергию с сжиженным природным газом в качестве теплоносителя. Доказано, система обеспечивает гибкость энергопотребления и повышает производительность за счет термодинамического анализа. Эффективность системы превышает 95,2 %, что выше, чем у других систем CES.

В работах [14, 15] рассматривается термодинамический и теплофизический анализ использования энергии СПГ, установок, работающих по комбинированному циклу Ренкина, - цикл можно разделить на две части: верхнюю часть цикла Ренкина, в которой используется рабочее тело, и нижнюю часть, в которой происходит прямое расширение СПГ. В [14] рассмотрено несколько вариантов цикла Ренкина: одноступенчатый цикл Ренкина (SRC), двухступенчатый цикл Ренкина с параллельными циклами (PTRC), каскадный двухступенчатый цикл Ренкина (CTRC). Доказано, что CTRC повышает эффективность использования эксергии за счет увеличения испаряемости.

Методология исследования. На рис. 1 представлена схема криогенной силовой установки, рабочим веществом которой является жидкий воздух. Криогенное рабочее тело (жидкий воздух), при помощи криогенного насоса (1 – 2) поступает в испаритель (4 – 7), где жидкий воздух получает тепловую энергию от воздуха из окружающей среды. Газообразный воздух поступает в турбину (7 – 9), где происходит изэнтропийное расширение, часть воздуха отводится из средней части турбины в регенеративный подогреватель (8 – 3) для дополнительного подвода тепловой энергии рабочему телу, оставшаяся часть воздуха совершает полный цикл расширения, после чего конденсируется за счет передачи теплоты в конденсаторе (9 – 1) жидкому азоту, который в свою очередь перекачивается с помощью насоса из криогенного баллона в теплообменный аппарат.

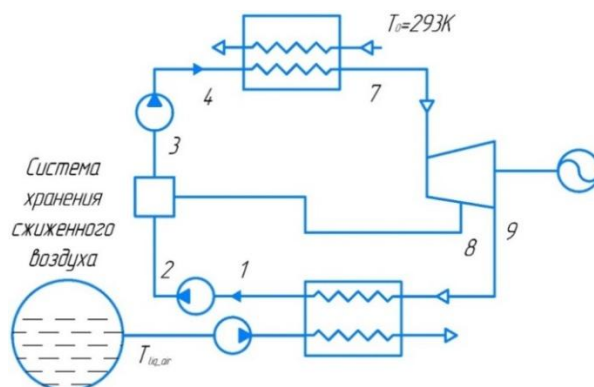


Рис. 1. Схема криогенной системы аккумуляции энергии, работающей по закрытому циклу Ренкина с регенерацией

Криогенная система аккумулирования энергии (рис. 1) совершает работу по закрытому циклу Ренкина с регенерацией, показанному на тепловой диаграмме (рис. 2). Стоит отметить, что при общем расходе пара мощность турбины становится меньше, термический КПД цикла возрастает по сравнению с исходным циклом. Это связано с тем, что средняя температура подвода тепла в парогенераторе возрастает при неизменной температуре отвода тепла в конденсаторе.

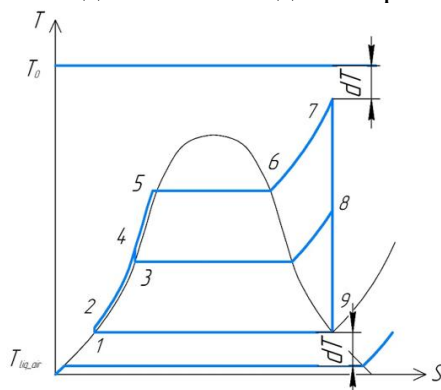


Рис. 2. Изображение процессов закрытого цикла Ренкина с регенерацией на T - S диаграмме

Исходные данные для термодинамического расчета представлены в табл. 1. Результат термодинамического анализа в характерных точках цикла представлен в табл. 2.

Таблица 1. Исходные данные

Рабочее вещество	G , кг/с	$T_{\text{возд.ж}}$, К	T_0 , К	$\eta_{\text{насос}}$	$\eta_{\text{т}}$	dp	dT
Воздух	1	77	293	0,92	0,89	1	1

Таблица 2. Термодинамический расчет в характерных точках цикла Ренкина

Параметр	Расчет
Температура в точке 7	$T_7 = T_0 - dT$
Температура в точке 1	$T_1 = T_{\text{возд.ж}} + dT$
Давление в точке 1	$p_1 = f(T_1)$
Давление в точке 4	$p_4 = p_1 + dp \cdot 100000$
Давление в точках 5, 6, 7	$p_5 = p_6 = p_7 = p_4$
Давление в точке 9	$p_9 = p_1$
Температура в точке 3	$T_3 = T_1 + \frac{T_5 - T_1}{2}$
Давление в точке 3	$p_3 = f(T_3)$
Энтальпия в точке 2	$h_2 = h_1 + \frac{p_3 - p_1}{\rho_1 \cdot \eta_{\text{насос}}}$
Энтальпия в точке 4	$h_4 = h_3 + \frac{p_4 - p_3}{\rho_3 \cdot \eta_{\text{насос}}}$
Доля пара, отбираемая из средней части турбины	$\alpha = \frac{h_3 - h_2}{h_8 - h_2}$

Работа насосов и турбины в цикле определяются по формулам:

$$W_{p1} = G(1-a)(h_2 - h_1) .$$

$$W_{p2} = G(h_4 - h_3) .$$

$$W_p = W_{p1} + W_{p2} .$$

$$W_t = G(h_7 - h_8) + G(1-a)(h_8 - h_9) .$$

Мощность определяется, как разница между работой вырабатываемой турбиной и потребляемой насосами:

$$N = W_t + W_p .$$

Площадь теплообмена найдем по формуле:

$$F_2 = \frac{Q_2}{K_2 \cdot dT_2} .$$

Стоимость теплообменного оборудования, (руб):

$$ZT_1 = (2143 + F_1^{0,514}) \cdot 1000 = (2143 + 29,5^{0,514}) \cdot 1000 .$$

$$ZT_2 = (2143 + F_2^{0,514}) \cdot 1000 = (2143 + 378,8^{0,514}) \cdot 1000 .$$

Стоимость насоса и турбины (руб) будут определены по формулам ниже:

$$ZN_1 = 1120 \cdot W_{p1}^{0,8} .$$

$$ZN_2 = 1120 \cdot W_{p2}^{0,8} .$$

$$ZT = 6000 \cdot W_t^{0,7} .$$

Общая стоимость криогенной установки:

$$Z = ZT_1 + ZT_2 + ZN_1 + ZN_2 + ZT$$

Термический КПД цикла Ренкина:

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_2} = \frac{G \cdot (h_7 - h_4) - G(1-a) \cdot (h_9 - h_1)}{G \cdot (h_7 - h_4)} .$$

Распределение совокупности полученных значений мощности и стоимости в результате расчета в программно-аналитическом комплексе, реализованного на языке программирования Python, и распределение данных значений по эффективности Парето для двойного закрытого цикла Ренкина показано на рис. 3.

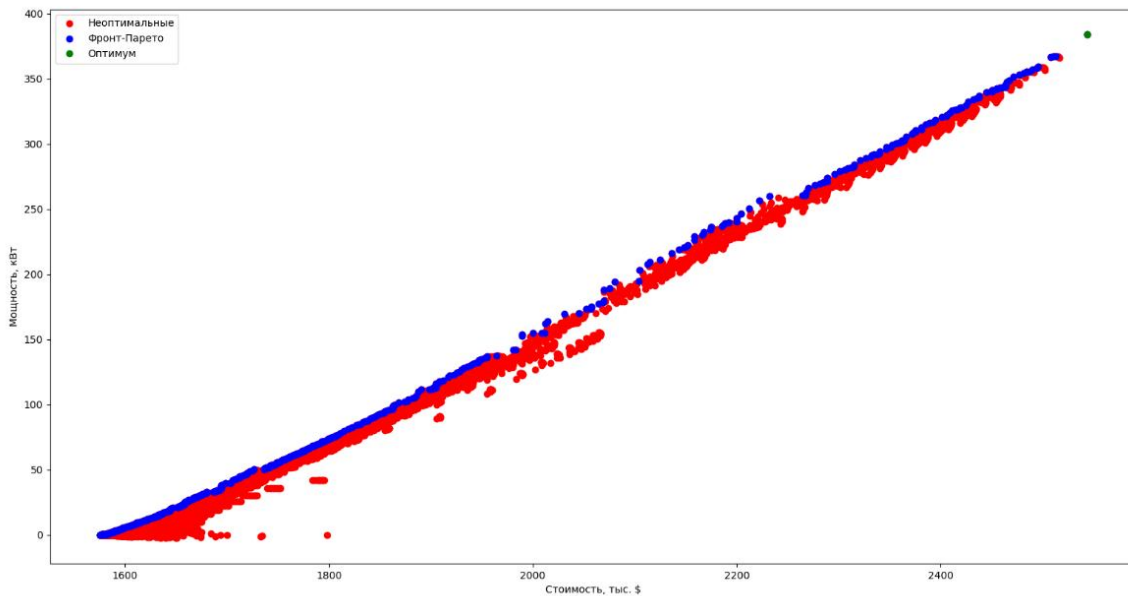


Рис. 3. Распределение совокупности полученных значений мощности и стоимости в результате расчета в программно-аналитическом комплексе и распределение данных значений по эффективности Парето для цикла Ренкина с регенерацией

Результаты исследования и их анализ. При анализе популяции фронта Парето особый интерес представляет тип рабочего тела, которое циркулирует в Парето-оптимальных конфигурациях контура. Фронт Парето с указанием рабочих тел представлен на рис. 4.

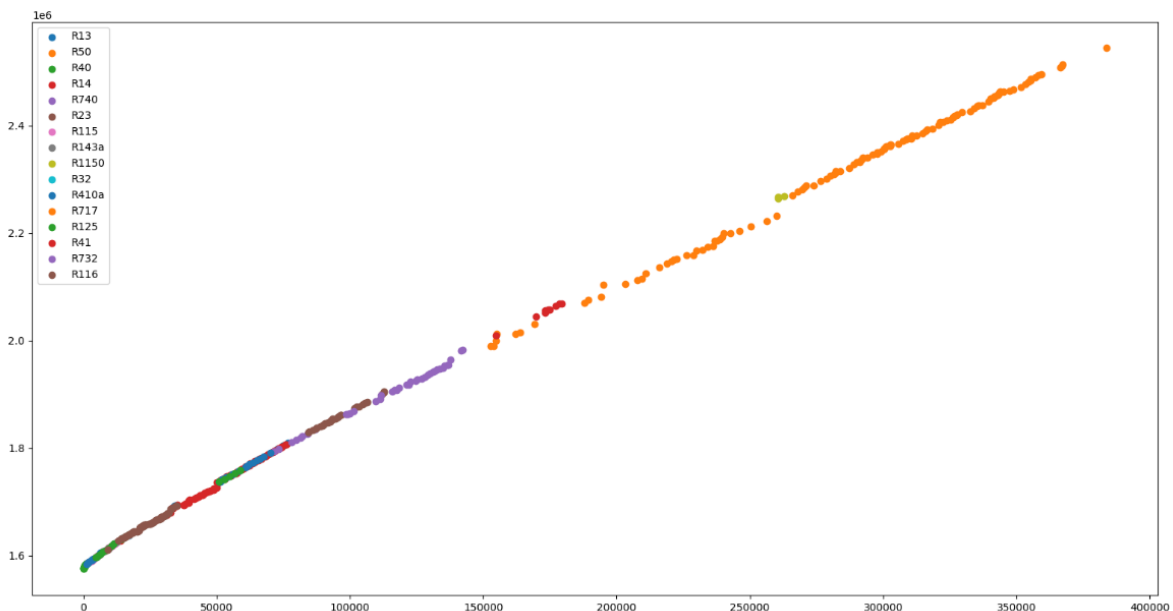


Рис. 4. Фронт Парето с указанием рабочих тел

Из анализа графической зависимости можно сделать вывод, что в более мощной и дорогой области фронта представлены установки, работающие на метане (R50) с небольшим количеством установок, работающих на R1150, ниже представлены установки, работающие на органических рабочих телах. Анализ общего количества установок представлен на рис. 5.

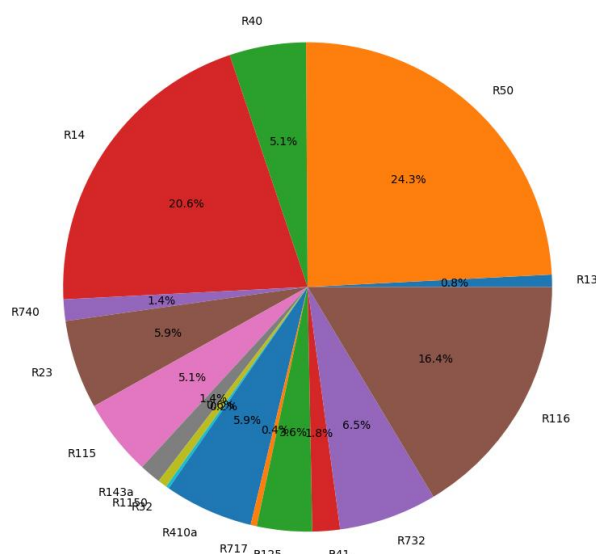


Рис. 5. Соотношение парето-оптимальных конфигураций по рабочим телам

Видно, что наиболее представленные рабочие тела в популяции Парето – метан, R14 и R116. При этом наиболее дорогие и мощные установки работают на метане, а более дешевые и менее мощные – на R14 и R116. Это можно объяснить тем, что остальные вещества делят между собой относительно узкую область маломощных дешевых установок.

Как было указано выше, величина срока окупаемости будет пропорциональна отношению стоимости установки к ее мощности. Аналогичным образом можно оценить рентабельность установки, которая в свою очередь будет пропорциональна отношению мощности к стоимости. В таком случае установка, у которой это отношение будет максимальным и будет наиболее рентабельной. Анализ рентабельности установок по данному отношению представлен на рис. 6.

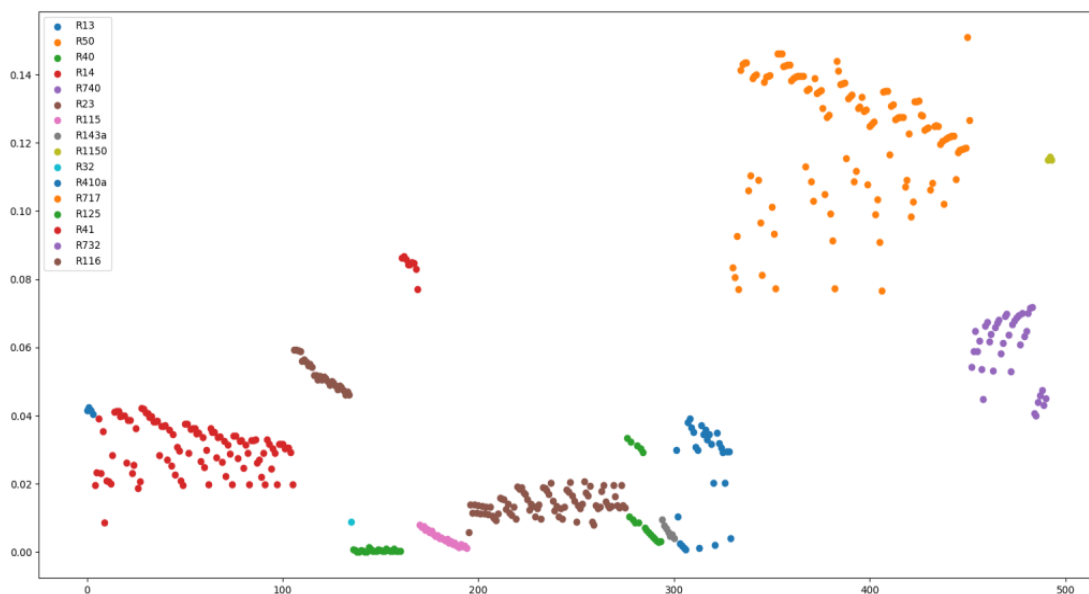


Рис. 6. Рентабельность установок в зависимости от типа рабочего тела

Из анализа графика также следует, что наиболее рентабельными конфигурациями контура являются конфигурации, использующие метан в качестве рабочего тела. Однако, тем не менее конфигурацией с наибольшей рентабельностью является конфигурация, использующая в качестве рабочего тела аммиак (представляющий в популяции всего 0,4 %) с повышением давления в насосе на 7 бар, минимальным температурным напором в теплообменниках 1 К и отводом 14,56 % рабочего тела на регенерацию при давлении 124 кПа.

В ходе термодинамического расчета оптимальной конфигурации контура регазификации криогенной системы аккумулирования энергии, работающей по циклу Ренкина с регенерацией, были получены значения параметров в характерных точках цикла (таблица 3).

Таблица 3. Значения термодинамических параметров в характерных точках криогенной системы аккумулирования энергии, работающей по циклу Ренкина с регенерацией

Точки цикла	p , кПа	T , К	h , кДж/кг	s , кДж/(кг·К)	ex , кДж/кг	G , кг/с
1	110	241,5	201,7	0,92	314,2	0,16
2	124,3	241,5	201,8	0,93	314,3	0,16
3	124,3	243,9	212,9	0,97	311,9	0,16
4	810	244,1	214,06	0,98	293,2	0,16
5	810	291,3	430,9	1,78	292,07	0,16
6	810	291,3	1624,3	5,8	285,5	0,16
7	810	292	1626,1	5,8	285,4	0,16
8	124,3	243,9	1435,3	5,9	285,4	0,16
9	110	241,4	1424,3	5,9	66,3	0,16
B1	100	77	-122,7	2,82	743,1	1,0
B2	100	77	76,8	5,4	185,5	1,0

На следующем этапе производится эксергетический анализ оптимального контура регазификации криогенной системы аккумулирования энергии, работающей по циклу Ренкина.

Эксергия вещества в i -ой точке определяется следующим образом:

$$ex_i = h_i - h_0 - T_0(s_i - s_0),$$

где h_i и s_i – энтальпия и энтропия в точке i , h_0 , s_0 и T_0 – энтальпия, энтропия и температура, соответствующие окружающей среде.

Тогда эксергетический КПД контура регазификации криогенного аккумулятора энергии можно определить следующим образом:

$$\eta_{ex} = \frac{N_{ц}}{(ex_{вх} - ex_{вых}) \cdot G}.$$

Эксергетический КПД контура регазификации оптимальной конфигурации составил $\eta_{ex} = 14,2\%$.

Эксергетический КПД узлов энергоустановки можно определить следующим образом:

Насос:

$$\eta_{\text{exн}} = \frac{ex_{i+1}}{ex_i + l_{\text{н}}};$$

Компрессор:

$$\eta_{\text{exк}} = \frac{ex_{i+1}}{ex_i + l_{\text{к}}};$$

Турбина:

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

Теплообменник:

$$\eta_{\text{exто}} = \frac{ex_{\text{т}i+1} + ex_{\text{к}i+1}}{ex_{\text{т}i} + ex_{\text{к}i}},$$

где $ex_{\text{вых}}$ – эксергия на выходе узла, $ex_{\text{вх}}$ – эксергия на входе узла; индекс $i+1$ соответствует точке на выходе из узла, а i – на входе в узел.

Потери эксергии можно определить следующим образом:

$$\Delta ex = ex_{\text{вх}} - ex_{\text{вых}} = ex_{\text{вх}} (1 - \eta_{\text{ex}}).$$

На рис. 7 представлены значения эксергетического КПД и потерь эксергии в каждом узле криогенной системы аккумулирования энергии. Исследование показало, что наибольший уровень эксергетических потерь наблюдается в конденсаторе, что обусловлено большим температурным напором между средами. Данный процесс характеризуется значительными потерями энергетического потенциала, связанными с необратимыми термодинамическими преобразованиями.

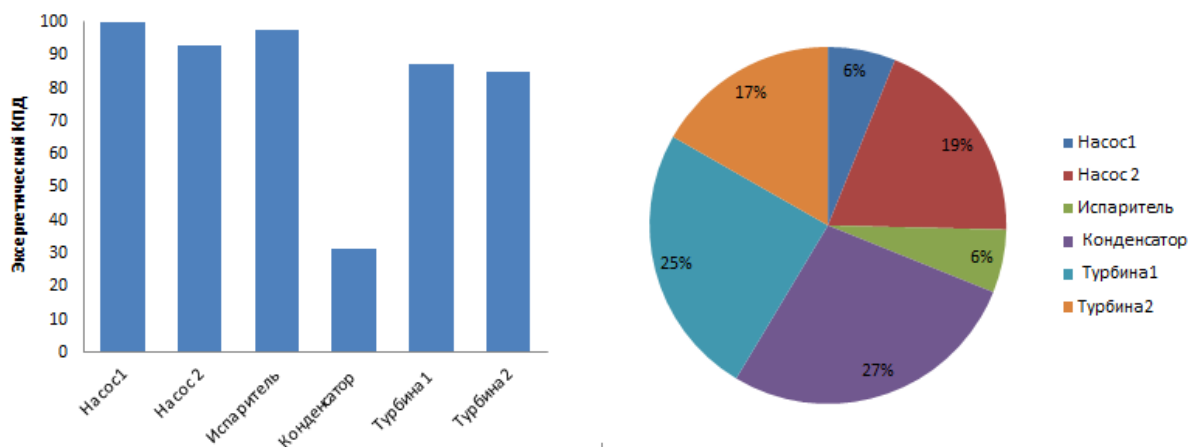


Рис. 7. Результат расчета эксергетического анализа

Выводы. В данной работе представлены результаты исследования, направленного на оптимизацию контура регазификации криогенной системы аккумулирования энергии, функционирующего в рамках термодинамического цикла Ренкина с регенерацией тепловой энергии. В ходе исследования были детально проанализированы ключевые параметры системы, включая эффективность, эксергетический анализ, рентабельность установок и анализ фронта Парето. Особое внимание уделялось разработке и внедрению методов повышения энергоэффективности за счет оптимизации конструктивных элементов и режимов работы. Полученные данные свидетельствуют о значительном потенциале предложенных решений для повышения общей производительности и надежности криогенных энергетических систем.

Из анализа популяции фронта Парето преобладают такие рабочие тела, как метан (CH_4), R14 (дихлорметан, CH_2Cl_2) и R116 (гексафторэтан C_2F_6). Примечательно, что наиболее дорогостоящие и высокопроизводительные установки функционируют на метане, тогда как более бюджетные и менее мощные системы используют R14 и R116. Это можно объяснить тем, что оставшиеся рабочие тела распределены между относительно узким сегментом маломощных и недорогих установок.

Для повышения общей энергоэффективности системы необходимо провести дальнейшие исследования и оптимизацию критического узла, которым является конденсатор. Это включает в себя анализ возможности применения более эффективных материалов и технологий, а также разработку новых методов управления термодинамическими процессами в конденсаторе.

Таким образом, детальный анализ потерь эксергии в конденсаторе является важным этапом в разработке и совершенствовании криогенных систем аккумулирования энергии. Он позволяет выявить ключевые направления для повышения эффективности и надежности таких систем, что имеет большое значение для развития современной энергетики и технологий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Zhu, H. M. A novel two stage ethylene Rankine power cycle with cold energy recovery of LNG / H. M. Zhu, Q. Li, H. Sun // *Advanced Materials Research*. – 2013. – V. 724. – P. 932-936. – DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.724-725.932.
2. Sun, H. Process Simulations of the Cold Recovery Unit in a LNG CCHP System with Different Power Cycles / H. Sun, H. M. Zhu, Liu H. W. // *Advanced Materials Research*. – 2011. – V. 90. – P. 3026-3032.
3. Performance enhancement of two-stage condensation combined cycle for LNG cold energy recovery using zeotropic mixtures / J. Bao [et al.] // *Energy*. – 2018. – V. 157. – P. 588-598. – DOI 10.1016/j.energy.2018.05.187.
4. Zhu, H. M. Exergy analysis of cascade Ethylene-Propane Rankine cycle with cold energy recovery of LNG / H. M. Zhu, H. W. Liu, H. Sun // *Applied Mechanics and Materials*. – 2012. – V. 170. – P. 2489-2493.
5. Liu, Ya. Exergoeconomic analysis and multi-objective optimization of a CCHP system based on LNG cold energy utilization and flue gas waste heat recovery with CO_2 capture / Ya. Liu, J. Han, H. You // *Energy*. – 2020. – Vol. 190. – P. 116201. – DOI 10.1016/j.energy.2019.116201. – EDN SRKUIU.
6. Lee, I. Conceptual design and exergy analysis of combined cryogenic energy storage and LNG regasification processes: Cold and power integration / I. Lee, J. Park, I. Moon // *Energy*. – 2017. – V. 140. – P. 106-115.
7. Exergy recovery during LNG regasification: Electric energy production–Part one / Dispenza C. [et al.] // *Applied Thermal Engineering*. – 2009. – V. 29. – №. 2-3. – P. 380-387.
8. Qiang, W. Analysis of power cycle based on cold energy of liquefied natural gas and low-grade heat source / W. Qiang, L. Yanzhong, W. Jiang // *Applied thermal engineering*. – 2004. – V. 24. – №. 4. – P. 539-548.

9. Analysis of different combined cycles and working fluids for LNG exergy recovery during regasification / Badami M. [et al.] // Energy. – 2018. – V. 159. – С. 373-384.
10. Combined cascaded Rankine and direct expander based power units using LNG (liquefied natural gas) cold as heat sink in LNG regasification / García R. F. [et al.] // Energy. – 2016. – V. 105. – P. 16-24.
11. Ahmadi, M. H. Thermodynamic and exergy analysis and optimization of a transcritical CO₂ power cycle driven by geothermal energy with liquefied natural gas as its heat sink / M. H. Ahmadi, M. Mehrpooya, F. Pourfayaz // Applied Thermal Engineering. – 2016. – V. 109. – P. 640-652.
12. Thermodynamic analysis and optimization of a waste heat recovery system for proton exchange membrane fuel cell using transcritical carbon dioxide cycle and cold energy of liquefied natural gas / M. H. Ahmadi [et al.] // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2016. – V. 34. – P. 428-438.
13. Naseri, A. Thermodynamic and exergy analysis of a hydrogen and permeate water production process by a solar-driven transcritical CO₂ power cycle with liquefied natural gas heat sink / A. Naseri, M. Bidi, M. H. Ahmadi // Renewable energy. – 2017. – V. 113. – P. 1215-1228.
14. Comparative study of Rankine cycle configurations utilizing LNG cold energy under different NG distribution pressures / Z. Sun [et al.] // Energy. – 2017. – V. 139. – P. 380-393.
15. Franco, A. Thermodynamic and heat transfer analysis of LNG energy recovery for power production / A. Franco, C. Casarosa // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2014. – V. 547. – №. 1. – P. 012012. –DOI 10.1088/1742-6596/547/1/012012.

Поступила в редакцию 01.07.2025 г., рекомендована к печати 04.08.2025 г.

PARETO ANALYSIS OF THE REGASIFICATION CONTOUR OF A CRYOGENIC ENERGY STORAGE SYSTEM OPERATING ON A RANKINE CYCLE WITH HEAT RECOVERY

SHimanova A.B., Pulkina A.IU., Galkina N.V., Karnaukh V.V., Sarmin D.V.

The study is devoted to optimizing the regasification circuit of a cryogenic energy storage system operating on a Rankine cycle with regeneration. Based on thermodynamic and exergetic analysis, the optimal configuration of the regasification circuit with air as the working medium has been determined. The efficiency of the Rankine cycle with heat recovery, which operates the regasification circuit, and its economic profitability have been evaluated. Using the Pareto analysis method, the most efficient working media were identified - methane, R14, R116, with the methane regasification circuit showing maximum capacity, and the best profitability for R14 and R116. It is established that the main losses of exergy are concentrated in the capacitor, which indicates a key direction for further increasing the efficiency of the system.

Keywords: air regasifier, Rankine cycle, entropy, efficiency, cryogenic balloon, exergy.

Шиманова Александра Борисовна

кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», Российская Федерация, г. Самара.
E-mail: capkova.ab@ssau.ru

SHimanova Aleksandra Borisovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Heat Engineering and Heat Engines of Samara National Research University, Russian Federation, Samara.

Пулькина Анастасия Юрьевна

старший преподаватель кафедры инженерной графики ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», Российская Федерация, г. Самара.
E-mail: pulkina.ayu@ssau.ru

Pulkina Anastasiia IUevna

Senior Lecturer at Department of Engineering Graphics of Samara National Research University, Russian Federation, Samara.

Галкина Наталья Викторовна

старший преподаватель кафедры инженерной графики ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», Российская Федерация, г. Самара.
E-mail: galkina.nv@ssau.ru

Galkina Natalia Viktorovna

Senior Lecturer at Department of Engineering Graphics of Samara National Research University, Russian Federation, Samara.

Карнаух Виктория Викторовна

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры холодильной и торговой техники имени Осокина В.В. ФГБОУ ВО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк;
профессор кафедры промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Самарский государственный технических университет», Российская Федерация, г. Самара.
E-mail: karnaukh.vita0629@gmail.com

Karnaukh Viktoriia Viktorovna

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at Department of Refrigerating and Trade Equipment Department of Tugan-Baranovskogo Donetsk National University of Economics and Trade, Russian Federation, DPR, Donetsk;
Professor at Department of Industrial Heat Power Engineering of Samara State Technical University, Russian Federation, Samara.

Сармин Дмитрий Викторович

кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», Российская Федерация, г. Самара.
E-mail: sarmin.d.v@mail.ru

Sarmin Dmitrii Viktorovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Heat Engineering and Heat Engines of Samara National Research University, Russian Federation, Samara.

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ И ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ Г. ДОНЕЦК

©2025 Копейка Д.В.

В работе представлены результаты анализа потенциальной эффективности основных видов солнечных коллекторов для климатических условий города Донецк. Определены величины фактической солнечной радиации и сопоставлены с нормативными значениями. Определены фактический коэффициент полезного действия и потенциальная производительность солнечных коллекторов для рассматриваемых условий.

Ключевые слова: солнечная радиация, солнечный коллектор, температура, коэффициент полезного действия, производительность.

Введение. Один из самых популярных альтернативных источников энергии – солнечное излучение. Солнечная энергия является возобновляемой и всеобщее доступной. Технологии, используемые в солнечной энергетике, постоянно совершенствуются, что позволяет повысить эффективность генерации, транспортировки, хранения и использования солнечной энергии.

Однако существуют определенные ограничения, которые существенно сказываются на потенциале использования солнечной энергии для различных регионов. Величина суммарной солнечной радиации, поступающая на 1 м² поверхности, имеет существенные суточные, сезонные и региональные колебания. Эти колебания необходимо учитывать при расчете потенциальной эффективности использования солнечных коллекторов.

Климат и погодные условия города Донецк являются достаточно подходящими для использования солнечной энергии. Для достоверного определения потенциальной эффективности использования солнечных коллекторов необходимо проанализировать фактические данные по солнечной радиации, а также эффективность современных технологий, используемых в солнечной энергетике. На основании проведенного анализа можно сделать выводы о потенциале солнечной энергетике для нашего региона.

На сегодняшний день существует несколько наиболее популярных разновидностей солнечных коллекторов. При этом выбор типа коллекторов определяется их показателями эффективности для рассматриваемых погодных и климатических условий, а также затратами на их установку. Цели использования солнечных коллекторов также могут играть важную роль при анализе эффективности их внедрения.

Анализ фактического солнечного излучения для г. Донецк. Для определения фактической солнечной радиации для условия г. Донецк были проанализированы фактические данные с метеостанций с 2010 по 2022 гг.

Результаты работы, представленные в статье, получены в ходе выполнения НИР в рамках Госзадания (FRRF-2024-0011).

На рисунке 1 отображено изменение годовой суммарной солнечной радиации, поступающей на 1 м^2 поверхности, за указанные период. Среднее значение за указанные период составило – $1449,9 \text{ кВтч/м}^2$.



Рис. 1. Изменение суммарной годовой солнечной радиации для г. Донецк

За период с 2010 по 2022 г. были проанализированы месячные данные по солнечной радиации, поступающей на 1 м^2 поверхности и определены средние значение для указанного периода (рис. 2).



Рис. 2. Среднемесячные показатели солнечной радиации для г. Донецк с 2010 по 2022 г.

Нормативные данные по суммарной солнечной радиации для г. Донецк содержатся в [1]. Сопоставление нормативных данных и фактических за рассматриваемый период отображены на рисунке 3. На рисунке 3 представлены фактические данные и нормативные данные для условий ясного неба и средней облачности. Можно заметить, что фактические данные за рассматриваемый период существенно отличаются от нормативных как для условий ясного неба, так и для средней облачности. Это говорит о том, что при расчете эффективности использования солнечной энергии, лучше отдавать предпочтение расчетным фактическим значениям.

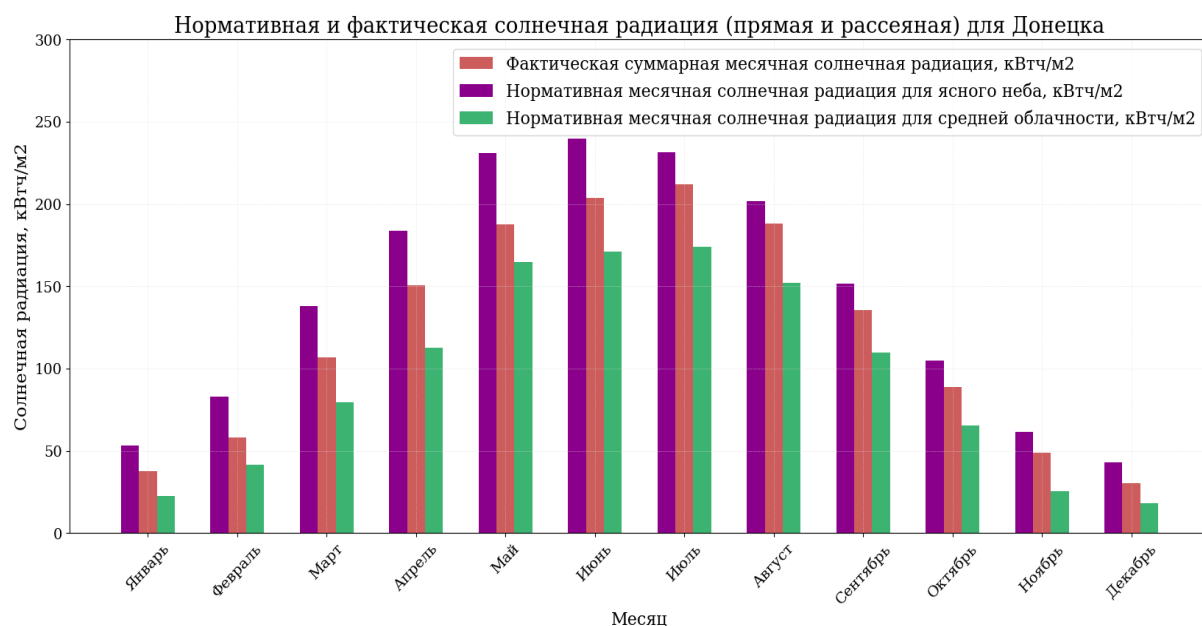


Рис. 3. Фактические и нормативные значения среднемесячной солнечной радиации

Важное значение при анализе потенциальной эффективности использования солнечной энергии имеет также часовые значения солнечной радиации в зависимости от времени года. Господствующие фактические погодные условия для того или иного месяца могут оказать существенное влияние на фактическую эффективность солнечных коллекторов. На рисунке 4 отображено среднечасовое изменение суммарной солнечной радиации в 2019 году для г. Донецк. Анализ фактических погодных данных, а также моделирование и прогнозирование фактической эффективности солнечных коллекторов в зависимости от фактических погодных данных, могут существенно повысить достоверность расчетов потенциальной эффективности солнечных коллекторов.

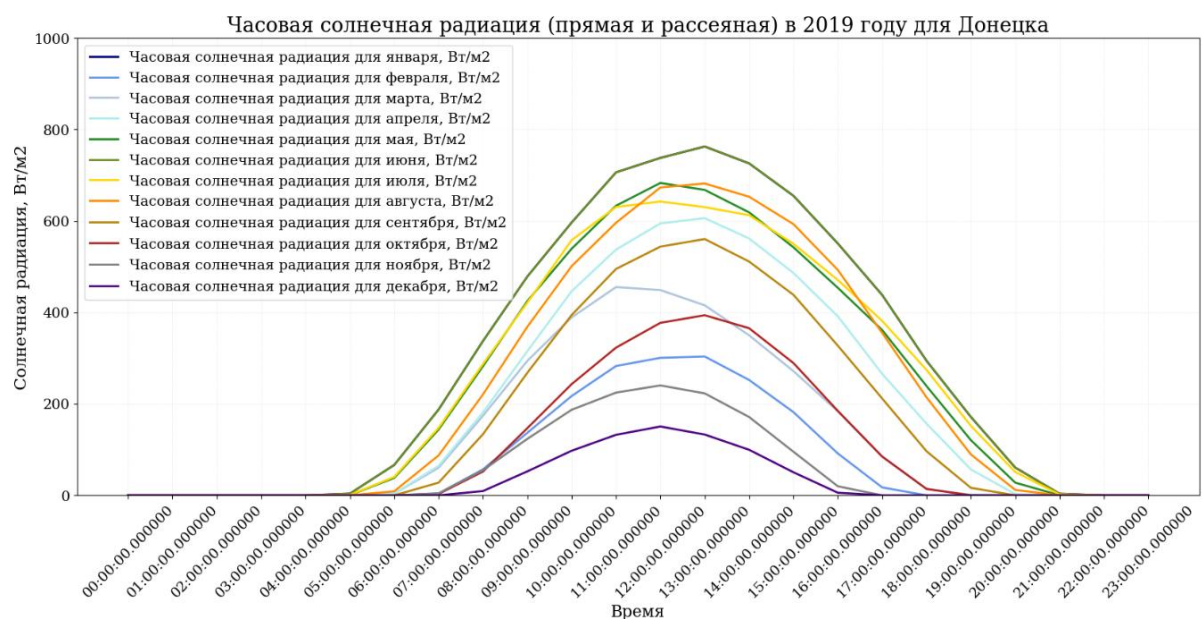


Рис. 4. Среднечасовые значения солнечной радиации по месяцам в 2019 году

Эффективность и производительность солнечных коллекторов. Наиболее распространенными видами солнечных коллекторов считаются плоский коллектор и трубчатый вакуумный [2].

Плоский коллектор представляет собой корпус с теплоизоляцией, покрытый стеклом, внутри которого находится абсорбер. Солнечная радиация, поглощаемая абсорбером, передается теплоносителю. Преимуществами таких коллекторов является простота конструкции и сравнительно невысокая стоимость. Однако при этом такие коллекторы обладают низким КПД в холодное время года, в связи с чем, используются, в основном, сезонно.

Трубчатый коллектор состоит из стеклянных трубок, в которых находится абсорбер и тепловая трубка с теплоносителем. Т.к. нагреваемые поверхности коллектора отделены от наружного воздуха вакуумом, то такие коллекторы эффективны и при отрицательных температурах наружного воздуха. Такие коллекторы обладают более высоким КПД, по сравнению с плоскими, однако имеют также и более высокую стоимость.

Также существуют концентрические (параболические) и низкотемпературные бесстекольные коллекторы, однако такие коллекторы не получили широкого распространения из-за ограниченной области применения.

Эффективность и производительность солнечных коллекторов. В общем виде, производительность солнечных коллекторов зависит от следующих параметров: количество суммарной солнечной радиации, КПД коллектора, температура окружающей среды, температура нагреваемого теплоносителя, ориентации и угла наклона коллектора.

Мгновенный КПД солнечного коллектора (т.е. КПД, который учитывает как технические характеристики солнечного коллектора, так и условия его эксплуатации) можно определить по формуле [3]:

$$\eta_k = \eta_0 - k_1 \cdot \frac{\Delta T}{\sum Q} - k_2 \cdot \frac{\Delta T^2}{\sum Q},$$

где η_0 – КПД коллектора при $\Delta T = 0$ (указан в паспортных данных коллекторов);

ΔT – разность между средней температурой теплоносителя в коллекторе и температурой окружающей среды, °С;

k_1, k_2 – коэффициенты тепловых потерь коллектора, Вт/м²·К (указываются в паспортных данных коллекторов);

$\sum Q$ – среднесуточная солнечная радиация для рассматриваемой местности, Вт/м².

Количество энергии, которая может быть сгенерирована с 1 м² солнечного коллектора (без учета КПД сопутствующего оборудования – теплообменников, подогревателей и т.д.), можно определить по формуле:

$$Q_{ген} = \frac{\eta_k \cdot \sum Q}{f},$$

где f – поправочный коэффициент, зависящий от расположения солнечного коллектора.

Зная технические характеристики используемого солнечного коллектора, условия эксплуатации, погодные данные, данные о солнечной радиации можно определить потенциальную эффективность солнечного коллектора или провести сравнительный анализ разных типов коллекторов для рассматриваемых условий.

Пример сравнительного анализа плоского и трубчатого коллекторов для погодных условий г. Донецк. При проведении сравнительного анализа было принято, что необходимая температура теплоносителя постоянна и составляет 60 °С (к примеру, на нужды ГВС). Температуры ХВС приняты фактические для г. Донецк (в пределах 5-20°С).

Данные по солнечной радиации были приняты фактические на основании анализа за период с 2010 по 2022 г. Среднемесячные температуры наружного воздуха были приняты фактические на основании анализа за период с 1993 по 2022 г. Данные по солнечной радиации и среднемесячной температуре воздуха отображены в таблице 1. Расположение коллектора принято южное, поправочный коэффициент f равен 1,0.

Таблица 1. Температура воздуха и солнечная радиация для г. Донецк

Параметр	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура воздуха t_{ext} , °С	-3,9	-3,0	2,0	9,9	16,2	20,6	23,1	22,6	16,2	9,2	2,3	-2,1
Суммарная месячная радиация, кВтч/м ²	37,5	58,4	107,0	150,8	187,7	203,8	212,3	188,1	135,8	88,9	49,0	30,6
Среднесуточная солнечная радиация $\sum Q$, кВт/м ²	1,2	2,1	3,4	5,0	6,1	6,8	6,8	6,1	4,5	2,9	1,6	0,99

Паспортные данные коллекторов, выбранных для сравнительного анализа, отображены в таблице 2.

Таблица 2. Паспортные данные коллекторов

Параметр	Плоский коллектор	Трубчатый коллектор
Коэффициент полезного действия, η_0	0,81	0,78
Коэффициент тепловых потерь k_1	4,05	1,15
Коэффициент тепловых потерь k_2	0,014	0,0064

В ходе анализа эффективности солнечных коллекторов для фактических климатических условий г. Донецк были получены данные о мгновенном КПД коллекторов (рис. 5), а также потенциальная производительность 1 м² площади коллекторов для принятых условий эксплуатации (рис. 6).

Можно сделать вывод, что трубчатые коллекторы имеют более плавную кривую эффективности. Их фактический КПД в меньшей степени зависит от колебаний наружной температуры или от изменения необходимой тепловой нагрузки. Другими словами, для круглогодичной нагрузки, а также при большей требуемой нагрузке следует отдавать предпочтение трубчатым коллекторам. КПД плоских коллекторов существенно снижается при отрицательных наружных температурах, однако в теплые месяцы их эффективность может быть даже несколько выше трубчатых, что делает их подходящими для сезонного использования.

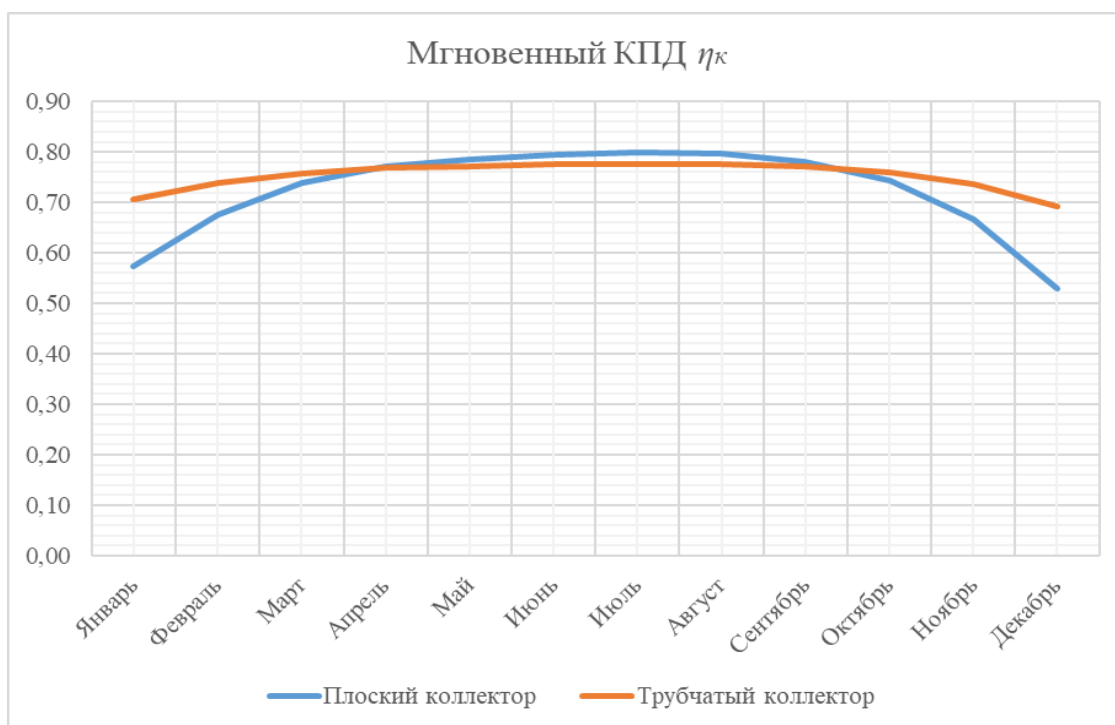


Рис. 5. Расчетный КПД солнечных коллекторов

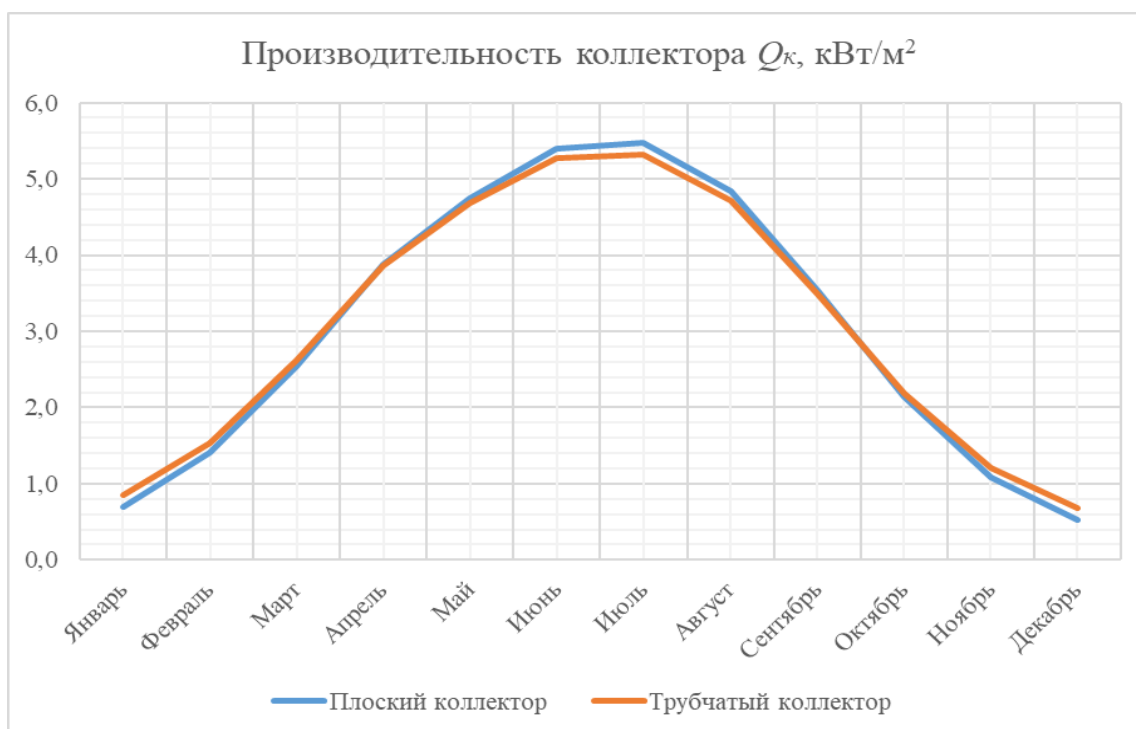


Рис. 6. Производительность коллекторов

Выводы. Климатические условия г. Донецк позволяют достаточно эффективно использовать потенциал солнечной энергии, в связи с чем, внедрение солнечных коллектор имеет значительные перспективы. При этом солнечные коллекторы могут эффективно работать как при круглогодичном, так и при сезонном использовании.

Однако следует учесть, что фактические погодные данные последних лет могут существенно отличаться от нормативных. Расчет эффективности коллекторов и их потенциальную производительность более рационально определять руководствуясь именно фактическими данными.

Пример расчета эффективности плоских и трубчатых коллекторов показывает, что для круглогодичного использования и при более высокой требуемой нагрузке целесообразно использовать трубчатые солнечные коллекторы. При этом при сезонном использовании плоские коллекторы также показывают высокую эффективность.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ДСТУ НБ В.1.1 27:2010. Защита от опасных геологических процессов, вредных эксплуатационных воздействий, от пожара. Строительная климатология: национальный стандарт Украины: введен 2011-11-01. – Киев: Министерство регионального развития и строительства, 2010. – 128 с.
2. Петренко, В. Н. Разработка системы горячего водоснабжения с использованием возобновляемых источников энергии / В. Н. Петренко, Н. В. Мокрова // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 2(25). – С. 23. – EDN QLIRIT.
3. Новгородский, Е. Е. Использование солнечной энергии в Ростовской области / Е. Е. Новгородский, С. В. Старовойтов // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 4(43). – С. 138. – EDN YJKSZD.

Поступила в редакцию 07.07.2025 г., рекомендована к печати 08.08.2025 г.

POTENTIAL EFFECTIVENESS OF SOLAR ENERGY USING FOR DONETSK CLIMATE AND WEATHER CONDITION

Kopeika D.V.

This paper provides the results of potential effectiveness analysis of main types of solar collectors under the climate conditions of Donetsk. The actual values of solar radiation were determined and compared to normative values. The coefficient of efficiency and potential productivity of solar collectors under the given conditions were also calculated.

Key words: solar radiation, solar collectors, temperature, efficiency coefficient, productivity.

Копейка Денис Вадимович

кандидат технических наук, научный сотрудник
молодежной научной лаборатории
«Приборостроение и станкостроение»
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный
технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: benj72008@rambler.ru

Kopeika Denis Vadimovich

Candidate of Technical Sciences, Researcher at the
Youth Scientific Laboratory «Instrumentation and
Machine Tool Engineering» of Donetsk National
Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

EDN NZGEIH

DOI 10.5281/zenodo.17395100

УДК 628.365:628.385:614.84

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГОРЯЧЕСТИ ОТЛОЖЕНИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СТОКОВ НА ПОЛЯХ ЕСТЕСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ
ГАЗОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

© 2025 Хуррамов М.Г., Назиров З.Ш., Джураева Н.Б.

В статье представлены результаты исследования горючих свойств отложений, образующихся при очистке экологически вредных производственных технологических стоков газоперерабатывающих предприятий на полях естественной фильтрации, расположенных вблизи населенных пунктов. В результате процессов удушения и выщелачивания в периодической эксплуатации в толще 60-80 см отлагаются органические вещества различного строения, предельные углеводороды (C₁₃-C₃₀), ароматические и токсичные полициклические соединения. Осадки начинают выделять искрящие пары при температуре 65°C, а сгорают при температуре 300°C. Количество горючих соединений 150-170 мг/кг. Индикаторы отложений на дне фильтровальных площадок помогают предотвратить опасные техногенные пожары.

Ключевые слова: поля естественной фильтрации, осадки технологический стока, показатели горючих свойств, техногенные пожары.

Введение. В настоящее время в производственных процессах газоперерабатывающих предприятий используется большое количество воды. В результате состав технологических стоков такого предприятия резко отличается тем, что состоит из соединений, обладающих специфическими реакционно-способными свойствами под воздействием физико-химических и биологических процессов, опасных с точки зрения горения, также опасные экологические проблемы. На объектах газовой промышленности самым распространенным методом очистки вод является сброс производственных стоков в пруды-испарители и на поля фильтрации без предварительной очистки.

Количество образующихся осадков составляет 0,5-1% по сравнению со стоками, отбрасываемыми на поля фильтрации. В составе осадка могут присутствовать органические и неорганические вещества. Из состава 40% органические вещества оседают на дно на поля фильтрации, 40% находятся в состоянии эмульсии, а 20 % образуют на поверхности воды пленку толщиной 0,5 мм и затрудняет важные природные процессы. Процессы естественного окисления органических веществ, опустившихся на дно поля фильтрации протекают в 10 раз сложнее, чем на поверхности воды [1-9].

Постановка задачи. Целью данной работы является исследование показателей горячности отложений технологических стоков на полях естественной фильтрации газоперерабатывающих предприятий.

Экспериментальные методы. В работе использовались стандартные методы физико-химического анализа проб сточных вод, отобранных в полевых условиях. Измерения проводились в соответствии с нормативно-технической документацией.

Результаты и их обсуждение. Объектом исследования послужили осадки технологических стоков «Муберек ГПЗ» в полях естественной фильтрации на расстоянии 3,0 км, расположенных вблизи населенных пунктов. Объем сброса стоков, согласно графика выпуска составляет 3500 м³/сутки. Категория: исходные производственные сточные воды, обладающие специфическими реакционно-способными свойствами и резким запахом серы. Все сточные воды, образующиеся на территории предприятия транспортируются по закрытому трубопроводу к месту спуска (рис. 1).



а)

б)

Рис. 1. Естественные поля фильтрации Муберек ГПЗ:
 а) вид спуска производственных стоков на естественные поля фильтрации;
 б) общий вид естественного поля фильтрации

Естественные фильтрующие поля завода представляют собой искусственные объекты, специально построенные рядом и периодически используемые. При подготовке фильтрационных площадок используют частицы песка с хорошей водопроницаемостью и капиллярностью размером $> 0,2$ мм и черноземы толщиной 100 мм. Коэффициент водоотдачи песка $= 10^{-15} - 10^{-12}$ м²; грунта $= 10^{-13} - 10^{-11}$ м² и коэффициент фильтрации песка $= 10^{-5} - 10^{-2}$ м/с; грунта $= 10^{-6} - 10^{-4}$ м/с; глины $= 10^{-7} - 10^{-6}$ м/с. Нагрузка на очистку сточных вод на полях составляет 50-200 м³/(га.сут) в зависимости от климатических условий, грунтовых вод и гранулометрического состава почвы. Глубина фильтрационных поля составляет 2,5-3 метра.

В природных полевых условиях процесс очистки сточных вод протекает медленно, под влиянием запасов кислорода в почве и микрофлоры, солнечной радиации, атмосферного воздуха, жизнедеятельности адаптированных к участку высоких водорослей, так как кислороду трудно поступать в глубокие слои почвы, трудно контролировать процессы обработки в них. Микрофлора активного ила на дне фильтрационных площадок включает бактерии, актиномицеты, дрожжи, грибы, одноклеточные водоросли, простых и беспозвоночных животных, их количество составляет 1-115 млн на 1г поверхностного слоя. В кислорододефицитных слоях почвы поглощение сточных вод осуществляет процесс анаэробного разложения, в результате которого образуются метановые газы CH₄, и CO₂. Объем выделяемого метана в первую очередь зависит от количества разлагаемых органических материалов в стоках, температуры и процессов естественного окисления органических веществ.

При повышении температуры выше $+15^{\circ}\text{C}$ увеличивается количество выделяемого CH_4 , что имеет большое значение, неуправляемо и неконтролируемо в полях фильтрации теплом климатах. Естественные поля фильтрации с незначительным проникновением воздуха воздействием естественной аэрацией, их глубина является решающим фактором выделения CH_4 . Неглубокие поля фильтрации, менее одного метра в глубину, как правило, обеспечивают аэробные условия и вероятность выделения CH_4 очень мала или равна нулю в осадке. Поля фильтрации, чья глубина превышает 2-3 метра, обеспечивают развитие анаэробной среды и можно ожидать образование значительного количества CH_4 в осадке [10-13].

Результаты наблюдения показали, что в природно-климатических, гидрологических и грунтовых условиях Каршинской степи, где завод находится, испарение стоков фильтрационных полей составляет 21-23%. В летний период на территории в степной зоне воздух особенно сильно прогревается.

В таблице 1 представлены результаты анализа химического состава производственных стоков при сбросе на естественные поля фильтрации.

Таблица 1. Показатели химического состава производственных стоков при сбросе

Определяемые показатели	Результаты исследований	Превышение нормативных значений ПДК, (+)
Температура	24-26 $^{\circ}\text{C}$	2
Запах (при 20 $^{\circ}\text{C}$)	4 \pm 1 балл	2
Водородный показатель	4,5-5,5 ед. рН	2,5
Взвешенные вещества	840,0 мг/дм 3	824,0
ХПК	495,0 мг O_2 /дм 3	305,0
БПК _{полн.}	103,0 мг O_2 /дм 3	99,0
Сульфаты	71,0 мг/дм 3	21,0
Хлориды	261,0 мг/дм 3	161,0
Азот аммонийной	8,5 мг/дм 3	8,0
Нитриты	0,6 мг/дм 3	0,6
Нитраты	4,1 мг/дм 3	4,1
СПАВ	0,3 мг/дм 3	0,3
Нефтепродукты	18,3 мг/дм 3	18,0
Фенолы	0,06 мг/дм 3	0,05
Минеральный состав	650,0 мг/дм 3	605,0
Сухой остаток	1920,0 мг/дм 3	920,0

Результаты проведенного исследования (табл. 1) свидетельствуют о том, что основные показатели качества воды не соответствуют нормативным значениям ПДК. По показателям ХПК и БПК_{полн.} химического загрязнения находится в пределах критических значений.

На рисунке 2 показаны пробы для анализов естественных полей фильтрации. По данным рис. 2а отмечено, что осадки поля фильтрации черного цвета, по структуре и консистенции осадок образующийся производственными стоками, бывает разной крупности и твердости, запах по органолептической шкале 5 баллов, водородные показатели рН= 4,5-5,0. Кинематическая вязкость осадки выше 110 мм 2 /с, они обладают свойством устойчивости и удержания на дне месторождения. Частицы осадки обладают ровным поверхностной оболочкой это свидетельствуют о том, что осаждаются на дно с постоянной скоростью и хлопьевидным, то есть частицы имеют липкую поверхность, которые в процессе осаждения коагулируют.



Рис. 2. Пробы для анализов естественный поля фильтрации:
а) пробы из осадка дна поля фильтрации; б) пробы производственных стоков

Нами были проведены исследования путем отбора обезвоженных проб донных отложений для определения показателей горючих свойств. Результаты показали, что в открытом тигле осадки начинают выделять искрящие пары при температуре 65°C. При достижении температуры 300°C образец начинал воспламеняться. В опыте количество горючих смесей составляло 150-170 мг/кг. Зольность составила 5-6%, которые относятся к приоритетным загрязняющим веществам. Теплота сгорания сухих проб донных отложений составляет 17,5-18,0 МДж/кг.

Анализ состояния осадочных слоев показывает, что практически во всех полях фильтрации постоянно протекают процессы разложения органики (C₁₃-C₃₀), газовыделения, химического взаимодействия. Работа техники усиливает процессы порообразования в толще на картах полей фильтрации. Под воздействием бактерий осадочные слои перегнивают вместе со всеми живыми организмами, земля приходит в негодность.

Смесь реакционных веществ SN₄, SO₂, N₂, H₂S в парах, выходящих из-под почвы, считается опасной по свойствам горения. Эти компоненты осадка при анаэробном распаде могут выделять СН₄ [2, 3, 10, 14-17].

Для определения количества объемов образования донных отложений в полей фильтрации использовали формулу:

$$Q_{\text{осадки}} = q_w (C_{\text{нач.вв}} - C_{\text{осед.вв}}) / (100 - P_{\text{об.осад.}}) \cdot 10^{-4},$$

где $Q_{\text{осадки}}$ - количество осевшего осадка, м³/год; q_w - расход сточной воды, м³/год; $C_{\text{нач.вв}}$ - содержание взвешенных веществ в поступающей стоке воде, мг/дм³; $C_{\text{осед.вв}}$ - содержание взвешенных веществ в осветленной воде, мг/дм³; $P_{\text{об.осад.}}$ - процент обводненности осадка, %.

Общее количество разлагаемых органически материалов в стоках рассчитывается по формуле:

$$M_{\text{об.мат.}} = P \cdot W \cdot ХПК,$$

где $M_{\text{об.мат.}}$ – общая количество, разлагаемый органически материалов в стоках завода, кг ХПК/год, P – общий объем производства, т/год, W – общая количество стоков в поля фильтрации, м³/т, $ХПК$ – химическая потребность в кислороде, кгO₂/м³,

Нижний концентрационный предел воспламенения органических веществ в воздухе на картах полей фильтрации рассчитывается по формуле:

$$C_{\text{н.л}} = 400/4,32 \cdot \eta + 4,68\%,$$

где η – число атомов кислорода, необходимое для сгорания одной молекулы вещества.

Число атомов кислорода, необходимое для сгорания одной молекулы вещества, определяется из уравнения реакции горения вещества или по эмпирическому равенству:

$$\eta = (C - S) - H - X / 2 \cdot O \% ,$$

где C , S , H , X , O – число атомов соответственно углерода, серы, водорода, галоидов и кислорода в молекуле вещества.

Уровень экологической опасности отложений находится по следующей формуле:

$$K_i = C_i / W_i ,$$

где K_i – степень экологической опасности компонентов отложений; C_i – количество компонента в осадке, мг/кг; W_i – коэффициент экологической опасности компонентов отложений;

Расчеты показали, что отложения на дне площадки относятся к III группе уровня санитарно-гигиенической опасности [3, 6, 11-13].

Выводы. Таким образом, проведенные исследования донных отложений естественных полей фильтрации показывают, что осадки содержат вредные вещества, в том числе взрывоопасные и пожароопасные, с высокой реакционной способностью. В периодически используемых фильтрационных полях соединения, отложившиеся в результате процессов удушья и отстаивания, представляют собой трудноокисляемые органические вещества толщиной 60-80 см, а в процессах разложения образуют реактивные вещества, опасные для горения. С годами при использовании фильтровальных площадей увеличивается и их концентрация, при накоплении кислорода в процессе длительной эксплуатации выше допустимых значений, возрастает риск техногенного возгорания. По результатам проведенного эксперимента можно констатировать, что попадание неочищенных технологических стоков для очистки естественной фильтрации, со временем вызовет опасные экологические проблемы. В климатических условиях республики запах с полей очень сильный, особенно в летнее время. Исследованный участок естественных полей фильтрации являются дополнительным источником загрязнения подземных водных ресурсов. Полученная информация о количестве и свойствах горючих отложений, хранящихся на дне естественных полей помогает защитить от опасных техногенных пожаров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Классификация и система обращения с отходами первичной переработки нефти / Т. Н. Боковикова, Е. Р. Шпербер, Д. А. Трухан [и др.] // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2013. – № 11. – С. 36-40. – EDN RTEZYP.
2. Исследования физико-химических свойств и термической деструкции отходов нефтеперерабатывающих предприятий / Я. И. Вайсман, И. С. Глушанкова, Л. В. Рудакова, М. С. Дьяков // Научные исследования и инновации. – 2010. – Т. 4, № 3. – С. 21-27. – EDN LGUOWO.
3. Анализ и обоснование методов обезвреживания и утилизации осадков сточных вод биологических очистных сооружений / И. С. Гуляева, М. С. Дьяков, Я. Н. Савинова [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – 2012. – № 2. – С. 18-32. – EDN OXHQUJ.
4. ГОСТ Р 54205-2010. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Наилучшие доступные технологии повышения энергоэффективности при сжигании: национальный стандарт Российской Федерации: введен 2012-01-01. – М.: Стандартинформ, 2011. – 36 с.
5. Определение класса опасности нефтешламов / В. В. Ермаков, А. Н. Сухонослова, Д. Е. Быков, Д. А. Пирожков // Экология и промышленность России. – 2008. – № 7. – С. 14-16. – EDN JVRWYV.
6. Евилевич, А. З. Утилизация осадков сточных вод / А. З. Евилевич. – М.: Стройиздат, 2009. – 310 с.

7. Иванов, Д. В. Биогеохимическое образование и окисление биогаза в техногенных грунтах по данным изотопно-химических исследований: автореф. дис. ... геол.-минерал. наук: 04.00.13 / Иванов Дмитрий Владимирович ; НПП «ВНИИЯГ». – Москва, 1998. – 25 с.
8. Мазлова, Е. А. Шламовые отходы нефтегазовых компаний / Е. А. Мазлова, И. А. Меньшикова // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2010. – № 1. – С. 20-23. – EDN LABYZX.
9. Оценка влияния полей фильтрации населенных пунктов и промышленных предприятий на подземные воды / Музыкин В. П., Мальцева О. А., Валькович А. А. [и др.] // М-лы 7-й Межд. н.-т. конф. «Сахаровские чтения 2007 года: экологические проблемы XXI века» (17–18 мая 2007 г.). – Мн.: МГЭУ им. А. Д. Сахарова, 2007 г. – С. 69–70.
10. ГН 2.1.7.12-1-2004. Перечень предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) химических веществ в почве: принят 2004-02-24. – Минск, 2004. – 26 с.
11. Минимизация воздействия на окружающую среду при обращении с твердыми нефтесодержащими отходами / Ю. И. Суркова, А. В. Максютин, Д. В. Мардашов [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 1. – С. 111-113. – EDN PYDLFB.
12. Сывороткин, В. Л. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы / В. Л. Сывороткин. – М.: ООО «Геонформцентр», 2002. – 250 с.
13. Туровский, И. С. Осадки сточных вод. Обезвоживание и обеззараживание / И. С. Туровский. – М.: Делипринт, 2008. – 375 с

Поступила в редакцию 03.06.2025 г., рекомендована к печати 27.06.2025 г

STUDY OF HOT INDICATORS OF TECHNOLOGICAL WATER DEPOSITS ON NATURAL FILTRATION FIELDS OF GAS PROCESSING ENTERPRISES

Khurramov M.G., Nazirov Z.SH., Dzhuraeva N.B.

The article presents the results of a study of the flammable properties of deposits formed during the purification of environmentally harmful industrial wastewater from gas processing plants in natural filtration fields located near populated areas. As a result of the processes of suffocation and leaching during periodic operation, organic substances of various structures, saturated hydrocarbons (C₁₃-C₃₀), aromatic and toxic polycyclic compounds are deposited in a thickness of 60-80 cm. Precipitates begin to emit sparkling vapors at a temperature of 65°C and burn at a temperature of 300°C. The amount of flammable compounds is 150-170 mg/kg. Indicators of sediments at the bottom of filter platforms help prevent dangerous man-made fires.

Keywords: fields of natural filtration, technological runoff, precipitation, indicators of combustible properties, man-made fires.

Хуррамов Мухтор Гулович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологического образования Каршинского государственного университета, Узбекистан, г. Карши.
E-mail: khurramov58@mail.ru

Khurramov Mukhtor Gulovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Technological education of Karshi State University, Uzbekistan, Karshi.

Назирова Зулхайнар Шаропович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологического образования Каршинского государственного университета, Узбекистан, г. Карши.
E-mail: nazirovzsh@mail.ru

Nazirov Zulkainar Sharapovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Technological education of Karshi State University, Uzbekistan, Karshi.

Джураева Нигина Баходировна

студент Шахрисабзского государственного педагогического института, Узбекистан, г. Шахрисабз.
E-mail: doniyordjuraev290@gmail.com

Dzhuraeva Nigina Bakhodirovna

Student of Shakhrisabz State Pedagogical Institute, Uzbekistan, Shakhrisabz.

60-ЛЕТИЮ КАФЕДРЫ РАДИОФИЗИКИ И ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Первый набор студентов на специальность «Радиофизика и электроника» состоялся в 1965 году — году основания Физического факультета Донецкого государственного университета [1]. Специальность открыта на кафедре низких температур и радиофизических методов исследований (НТиРФМИ), возглавляемой одним из основателей Физического факультета академиком Галкиным Александром Александровичем.



д-р физ.-мат. наук, профессор
Галкин Александр Александрович
04 июля 1914 – 22 октября 1982

начальник артснабжения войск Западного фронта ПВО (1943 г.). С 1945 по 1960 гг. работал в Харьковском физико-техническом институте АН УССР старшим научным сотрудником.

А.А. Галкин был талантливым организатором физической науки в УССР. Он участвовал в создании и развитии мощных институтов страны - Института радиоэлектроники АН УССР, Физико-технического института низких температур АН УССР. В 1960-1965 гг. занимал должность заместителя директора Физико-технического института низких температур АН УССР (г. Харьков). В 1965 г. под руководством А.А. Галкина создается Донецкий физико-технический институт АН УССР, который он возглавлял с 1965 по 1982 гг. и чье имя институт носит и сейчас.

Галкин был одним из основателей и первым председателем Донецкого научного центра АН УССР, им основана научная школа физики высоких давлений и спектроскопии твердого тела. По его инициативе ведущие ученые Донецкого физико-технического института начали преподавать на физическом факультете Донецкого государственного университета и готовить новые кадры для института.

Сам А.А. Галкин, обладая блестящим педагогическим талантом, был профессором, заведующим кафедрой низких температур и радиофизических методов исследований университета. Более 50 его учеников защитили кандидатские, более 15 - докторские диссертации. А.А. Галкин является автором свыше 300 научных работ, 2 монографий, 43 изобретений.

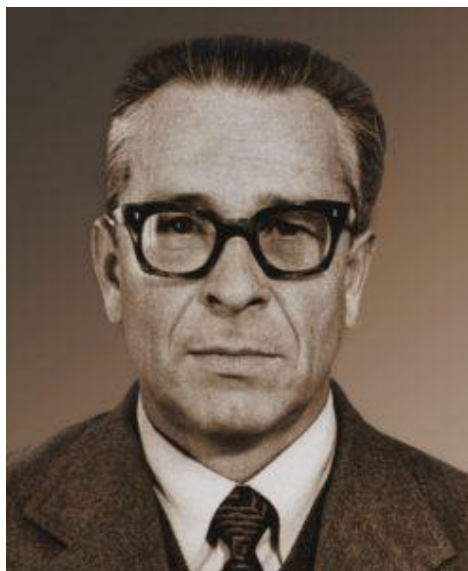
С 1994 года Донецкий физико-технический институт носит имя своего первого директора - академика А.А. Галкина.

Александр Александрович Галкин - выдающийся учёный, советский физик-экспериментатор, результаты фундаментальных исследований которого повлияли на развитие целого ряда разделов физики: сверхпроводимости, электронных свойств металлов, радиоспектроскопии, магнетизма, прочности и пластичности.

Галкин А.А. - доктор физико-математических наук (с 1955 г.), профессор (с 1956 г.), член-корреспондент АН УССР (с 1961 г.), академик АН УССР (с 1965 г.), основатель и директор Донецкого физико-технического института АН УССР (1965-1982 гг.), дважды лауреат Государственной премии УССР в области науки и техники (1971 г., 1982 г.), лауреат премии им. К.Д. Синельникова АН УССР (1975 г.), заслуженный деятель науки и техники УССР (с 1978 г), участник Великой Отечественной войны (1941-1945 гг.).

Родился в г. Бердянске. В 1939 г. окончил Харьковский государственный университет. С 1937 по 1941 гг. работал в Харьковском физико-техническом институте АН УССР старшим лаборантом и младшим научным сотрудником. Участвовал в Великой Отечественной войне: курсант Артиллерийской академии РККА имени Ф.Э. Дзержинского (1941 г.), начальник артмастерских войска Западного фронта ПВО (1942 г.),

В 1968 году по инициативе директора Донецкого физико-технического института АН УССР, академика Галкина Александра Александровича и декана Физического факультета, доцента Ковтуна Николая Моисеевича на базе кафедры НТиРФМИ создается кафедра электрорадиотехники и радиоспектроскопии (ЭРТиРС), которая является преемником кафедры НТиРФМИ в области радиоспектроскопии, физики магнитных явлений, разработки радиофизических методов исследований материалов, разработки электронных устройств сверхвысокочастотного диапазона и практического применения СВЧ-энергии.



д-р физ.-мат. наук, профессор
Ковтун Николай Моисеевич
12 июля 1932 – 26 декабря 2001

полупроводниках и диэлектриках (1978-1983 гг.), директора института (1982-1986 гг.). В 1975 г. защитил докторскую диссертацию по специальности «Физика магнитных явлений», в 1978 г. Ковтуну Н.М. присвоено учёное звание профессора. С 1990 г. по 2001 г. работал профессором кафедры радиофизики Донецкого государственного университета.

Основные направления научных исследований Ковтуна Н.М. были сосредоточены в области физики магнитных явлений. Николай Моисеевич Ковтун развивал работы по изучению магнитных свойств ферромагнитных и антиферромагнитных кристаллов, проводил экспериментальные и теоретические исследования спин-переориентационных фазовых переходов методом ЯМР в различных магнитных материалах, проводил ЯМР-исследования анизотропии сверхтонких взаимодействий в ортоферритах.

Ковтун Николай Моисеевич - автор свыше 120 научных публикаций, под его руководством защищены 14 кандидатских диссертаций.

Ответственность за подготовку студентов по специальности «Радиофизика и электроника» ректоратом Донецкого государственного университета была возложена на вновь созданную кафедру ЭРТиРС, которую и возглавил Ковтун Н.М. Большое значение в становлении и формировании кафедры имела группа молодых учёных-доцентов: Шульга Владимир Гаврилович, Степко Михаил Филимонович (декан Физического

Ковтун Николай Моисеевич – выдающийся учёный в области сверхтонких взаимодействий, магнитных свойств фазовых переходов в магнитных веществах.

Родился в с. Беленькое Борисовского района Белгородской области. В 1955 г. окончил физико-математический факультет Харьковского государственного университета, после чего учился в аспирантуре и до 1965 г. работал преподавателем университета. В 1961 г. защитил кандидатскую диссертацию. С января по июнь 1965 г. занимал должность старшего научного сотрудника Физико-технического института низких температур АН УССР (г. Харьков). С 1965 по 1967 гг. работал в Донецком физико-техническом институте АН УССР старшим научным сотрудником.

С 1967 по 1969 гг. работал в Донецком государственном университете в должности декана Физического факультета, а с 1968 г. одновременно заведующим кафедрой электрорадиотехники и радиоспектроскопии.

С 1969 по 1992 гг. работал в Донецком физико-техническом институте АН УССР в должностях: заместителя директора по научной работе (1974-1978 гг.), заведующего отделом резонансных явлений в магнитных



Студенты-радиофизики в лаборатории
Физического факультета

факультета в 1983-1986 гг.), Бондаренко Борис Николаевич, Шаворыкин Юрий Васильевич.

С 1969 по 1974 гг. кафедрой ЭРТиРС заведовал доцент Шульга Владимир Гаврилович. Основным направлением научной и научно-педагогической деятельности кафедры была физика явлений сверхвысокочастотного диапазона, ориентированная на создание электровакуумных и твердотельных приборов и устройств СВЧ.



д-р физ.-мат. наук, профессор
Шульга Владимир Гаврилович
30 марта 1935 – 4 января 2003

Шульга Владимир Гаврилович – учёный в области теоретической и практической радиофизики и радиоэлектроники.

Родился в с. Деменки Харьковской области. В 1958 г. окончил Киевский политехнический институт по специальности «Радиотехника». С 1958 по 1960 гг. работал инженером. С 1960 по 1963 гг. обучался в аспирантуре радиотехнического факультета Киевского политехнического института. В 1964 г. защитил кандидатскую диссертацию и получил диплом кандидата технических наук.

В 1964-1969 гг. работал в Харьковском институте радиоэлектроники в должностях: ассистент (1964 г.), старший преподаватель (1965 г.), доцентом кафедры физики СВЧ (до 1969 г.).

С 1969 по 1977 гг. работал в Донецком государственном университете в должности декана Физического факультета (1961-1971 гг.), заведующего кафедрой электрорадиотехники и радиоспектроскопии (1969-1974 гг.), доцента этой же кафедры (1971-1977 гг.).

В 1975 г. защитил докторскую диссертацию по специальности «Физическая электроника».

В 1977 г. назначен на должность ректора (1977-1980 гг.) и заведующего кафедрой оптики (1978-1984 гг.) Ужгородского государственного университета.

В 1980 г. Шульге В.Г. присвоено почетное звание Лауреата премии Совета Министров СССР по науке и технике.

В 1984 г. переехал в Киев, где работал доцентом и профессором кафедры акустики и акустоэлектроники Киевского политехнического института. С 1998 года работал старшим научным сотрудником Института электродинамики НАНУ.

Шульга Владимир Гаврилович – автор около 100 авторских свидетельств и патентов, более 130 научных работ в области теоретической и практической радиофизики, а также 12 научно-методических и 2 учебных пособий по теории электрических цепей. Под его руководством подготовлено 2 доктора наук и более 10 кандидатов наук.

В 1973 году на базе кафедры электрорадиотехники и радиоспектроскопии создается кафедра технических средств систем управления (ТССУ), на которую возлагается ответственность за подготовку студентов-радиофизиков со специализацией «Технические средства систем управления». В 1979 кафедра ТССУ переименовывается в кафедру кибернетики и вычислительной техники, а в 1991 – в кафедру компьютерных технологий и ее возглавляет (с 1991 по 2014 гг.) выпускник-радиофизик Каргин Анатолий Алексеевич (декан Физического факультета в 2006-2014 гг.), но это уже совершенно другая история.

С приходом на кафедру ЭРТиРС доцента Шепилова Николая Александровича (заведующий кафедрой с 1974 по 1989 гг.) деятельность кафедры, в том числе научная и учебная, дополняется и ориентируется исследованиями в области физических свойств перспективных для радиоэлектронной промышленности материалов (ферритов) в СВЧ диапазоне.



канд. физ.-мат. наук, доцент
Шепилов Николай Александрович
14 декабря 1944 – 13 октября 2001

Шепилов Николай Александрович – учёный физик.
Родился в г. Днепропетровске. В 1968 г. окончил кафедру электрофизики Днепропетровского государственного университета.

С 1968 г. начал работать в Донецком государственном университете. С 1968 по 1972 гг. работал заведующим учебной лабораторией и ассистентом кафедры физики низких температур.

В 1973 г. защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Физика конденсированного состояния» и начал работать доцентом кафедры физики низких температур.

С 1974 по 1989 гг. работал заведующим кафедрой электрорадиотехники и радиоспектроскопии, будучи одновременно деканом физического факультета с 1975 по 1983 гг. Далее до октября 2001 года работал доцентом кафедры радиофизики.

Научные интересы Шепилова Николая Александровича связаны с физикой магнитных явлений и радиоспектроскопией. Шепилов Н.А. опубликовал более 60 научных работ, под его руководством защищена 1 кандидатская диссертация.

В 1989 году, в связи с сокращением потребности СССР в специалистах - радиофизиках, специальность «Радиофизика и электроника», была закрыта, однако кафедра электрорадиотехники и радиоспектроскопии сохранилась, осуществляя базовую подготовку физиков.

В 1991 году кафедра электрорадиотехники и радиоспектроскопии была переименована в кафедру радиофизики (РФ), что стало следствием повторного открытия специальности «Радиофизика и электроника» на Физическом факультете ДонГУ.

Инициатором открытия специальности являлся Ученый совет Физического факультета, реализовал инициативу – доцент Пицюга Владимир Григорьевич, который и возглавлял кафедру РФ в 1991-1998 гг.



канд. физ.-мат. наук, доцент
Пицюга Владимир Григорьевич

Пицюга Владимир Григорьевич – учёный в области радиофизики и электроники.

Окончил радиофизический факультет Харьковского государственного университета по специальности «Радиофизика и электроника». Работал в Харьковском государственном университете, Харьковском институте низких температур, Донецком физико-техническом институте. В 1969 г. защитил кандидатскую диссертацию и получил диплом кандидата физико-математических наук, затем - ученое звание доцента. С 1991 по 1998 гг. и с 2000 по 2004 гг. работал заведующим кафедрой радиофизики. Далее до 2014 г работал доцентом этой же кафедры.

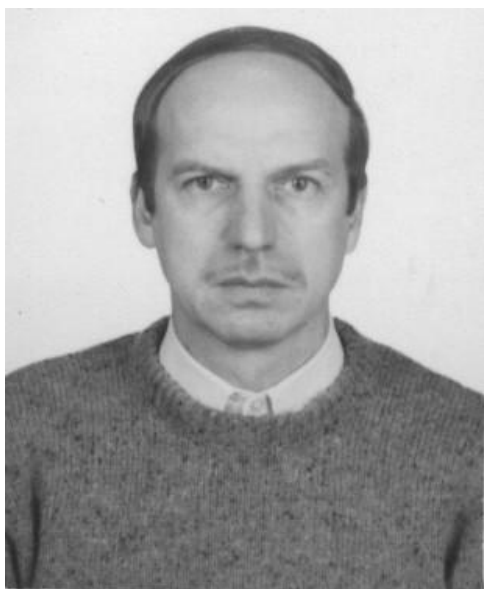
Пицюга В.Г. – автор более 200 научных работ, тематика которых связана с явлением ядерного магнитного резонанса.

Под его руководством кафедра радиофизики в рамках нескольких международных проектов осуществляет исследования магнитных свойств высокотемпературных сверхпроводников, в том числе в международном проекте 715 «Гидроструйная резка на атомных электростанциях» совместно с учёными США, Канады и Великобритании.

Открытие специальности мотивировалось структурной перестройкой промышленности Донбасса и развитием наукоемких технологий. К тому времени в Донецке работали Научно-исследовательский институт комплексной автоматизации (НИИКА), Донецкий физико-технический институт (ДонФТИ), два завода радиоэлектронного профиля («Топаз» и «Скиф»), два конструкторских бюро («Гранит» и «Специальные радиосистемы»). При этом основные центры подготовки специалистов по радиофизике и электронике находились в Харькове и Днепропетровске, а экономическая ситуация не способствовала притоку таких специалистов в Донбасс с его 5,5 миллионным населением.

В 90-е годы на кафедре радиофизики разрабатываются пакеты прикладных программ по спецкурсам, которые внедрены в учебный план по заказу предприятия «Топаз» и Научно-исследовательского института комплексной автоматизации. Сотрудниками кафедры был разработан и запущен в производство специальный усилитель СВЧ-диапазона, было получено 26 авторских свидетельств на изобретение, издана монография, защищено две кандидатские и три докторские диссертации. Кафедра сотрудничает с университетами Харькова, Днепропетровска, Ужгорода, Киева, Симферополя, а также с ранее перечисленными НИИ и предприятиями Донбасса. В НИИКА открывается филиал кафедры. В целом, кафедра успешно развивается, в чем большая заслуга сотрудников филиала-выпускников кафедры профессора Левченко Георгия Георгиевича, доцента Данилова Владимира Васильевича, доцента Цитрина Анатолия Григорьевича, доцента Зубко Леонида Дмитриевича.

С 1999 по 2000 гг. кафедрой руководил доцент Заблоцкий Виталий Арсенович, который ориентировал научное направление кафедры на физику сверхпроводников. Однако, полностью это реализовать не удалось из-за кратковременности его пребывания на посту заведующего в связи со сменой его места работы.



д-р физ.-мат. наук, профессор
Заблоцкий Виталий Арсенович

Заблоцкий Виталий Арсенович – учёный в области физики магнетизма и полупроводимости.

Родился 16 мая 1955 г. в г. Донецке. В 1977 г. окончил Физический факультет Донецкого государственного университета. С 1977 по 1979 гг. проходил службу в вооруженных силах СССР. С 1979 года начал работать ассистентом в Донецком государственном университете. В 1989 г. окончил аспирантуру ДонГУ и защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Физика конденсированного состояния». В 1996 г. защитил докторскую диссертацию по специальности «Физика магнитных явлений» и получил диплом доктора физико-математических наук. В 1998 г. получил ученое звание доцента.

С 1999 по 2000 гг. работал заведующим кафедрой и профессором кафедры радиофизики.

В настоящее время работает в отделе биофизики Института физики Академии наук Чешской Республики.

Заблоцкий В.А. – автор более 100 научных работ, из которых более 60 в зарубежных изданиях, имеет несколько авторских свидетельств, награжден нагрудным знаком «Изобретатель СССР».

Создавшаяся производственная необходимость явилась причиной того, что ректорат ДонНУ назначил руководить кафедрой доцента Пицюгу Владимира Григорьевича, который снова возглавлял кафедру с 2000 по 2004 гг.

С 2004 по 2025 гг. кафедрой радиофизики руководил выпускник кафедры 1975 года, доктор технических наук, профессор Данилов Владимир Васильевич [2].



д-р техн. наук, профессор,
заслуженный профессор ДонГУ
Данилов Владимир Васильевич

В 2004 году защищает докторскую диссертацию по специальности «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления» (технические науки). Диссертация и дальнейшие исследования направлены на решение проблемы повышения быстродействия вычислительных средств за счет перехода на оптоэлектронную элементную базу.

Более 20 лет (2004-2025 гг.) возглавлял кафедру радиофизики. С 2015 по 2016 гг. работал деканом Физико-технического факультета ДонНУ. С 2017 по 2018 гг. работал проректором по научной и инновационной деятельности ДонНУ. С февраля 2025 г. – Заслуженный профессор Донецкого государственного университета. С сентября 2025 г. продолжает работу в должности профессора кафедры.

Данилов В.В. – автор более 100 научных работ и 4 авторских свидетельств. Под его руководством защищены 1 докторская и 5 кандидатских диссертаций. Являлся членом Экспертного совета ВАК при МОН ДНР по физико-математическим и химическим наукам (2015-2020 гг.), по техническим наукам (2020-2023 гг.) и заместителем председателя совета по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора/кандидата наук Д 01.024.04 (2018-2023 гг.). В настоящее время является главным редактором журнала «Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки».

Под руководством заведующего кафедрой радиофизики доктора технических наук, профессора Данилова В.В. основным научным направлением кафедры являются исследования в области физических явлений потенциально пригодных для создания принципиально новых элементов и устройств радиотехники, вычислительной техники и информационных технологий. Большой вклад в этой области сделан доцентами Рудяковой Анной Николаевной и Липинским Александром Юрьевичем.

В 2011 году в связи с увеличивающейся потребностью в разработке организационно-правового, технического и программно-аппаратного обеспечения для защиты информации при ее обработке, хранении и передаче, и благодаря совместным усилиям д-ра техн. наук, профессора Белоусова Вячеслава Владимировича, д-ра техн. наук, профессора, декана Физического факультета Каргина Анатолия Алексеевича и д-ра техн. наук, профессора, заведующего кафедрой радиофизики Данилова Владимира Васильевича на кафедре радиофизики была открыта новая специальность «Безопасность информационно-коммуникационных систем». В этом же году Физический факультет в связи с открытием нескольких новых специальностей становится Физико-техническим.

Данилов Владимир Васильевич – учёный в области средств оптоэлектронных информационных технологий и оптической обработки информации.

Родился 02 июля 1948 г. в г. Ясиноватая. В 1975 г. окончил Физический факультет Донецкого государственного университета по специальности «Радиофизика и электроника». С 1976 по 1979 гг. работал заведующим учебной лабораторией кафедры ЭРТГРС.

В 1982 г. окончил аспирантуру Ужгородского государственного университета и защитил кандидатскую диссертацию.

С 1983 г. возвращается в Донецкий государственный университет и работает в должностях: младший научный сотрудник, старший научный сотрудник, ассистент, доцент.

Совмещая работу на кафедре с 1987 по 1999 гг. работает в Научно-исследовательском институте комплексной автоматизации в должностях: ведущий инженер, старший научный сотрудник, начальник сектора и отдела, ведущий научный сотрудник. Научно-прикладная деятельность в НИИКА связана с созданием оптоэлектронных приборов специального назначения и оптоволоконных медицинских систем.

В эти же годы на кафедре радиофизики так же ведутся работы по разработке и исследованию высокоэффективных высокочастотных и сверхвысокочастотных транзисторных усилителей мощности классов E и F. В состав научной группы, осуществляющих такую деятельность входили: д-р техн. наук, профессор Крыжановский Владимир Григорьевич, канд. техн. наук Чернов Дмитрий Викторович, канд. физ.-мат. наук Рассохина Юлия Валентиновна, Макаров Денис Григорьевич.

Однако, с началом гражданской войны в Донбассе в 2014 г. вышеуказанная группа и еще несколько сотрудников кафедры покидают родной университет и переходят в так называемый «Донецкий национальный университет» в г. Виннице.

Для кафедры настает не простое время, но все же её удастся сохранить. В этом неоценимый вклад сотрудников, оставшихся на кафедре (заведующий кафедрой, профессор Данилов Владимир Васильевич, старшие преподаватели Деркаченко Елена Васильевна, Белик Татьяна Владимировна, Долбещенков Вячеслав Васильевич, заведующий учебной лабораторией Стародубцев Юрий Александрович), приступивших к работе выпускников Физического факультета (профессор Малашенко Вадим Викторович, доценты Тимченко Владимир Иванович, Худяков Игорь Иванович, старшие преподаватели Кожекина Елена Николаевна, Бабичева Маргарита Вадимовна, старший лаборант Миронова Людмила Владимировна), а также выпускников кафедры радиофизики последних лет, которые продолжают работать на кафедре и сегодня (ассистент Долбещенкова Наталья Вячеславовна, лаборанты Третьяков Игорь Александрович, Джанджгава Карина Геннадьевна).

В 2015 году постепенно начинается процесс интеграции в Российское образовательное пространство и перехода на Российские образовательные стандарты, вследствие чего специальность «Безопасность информационно-коммуникационных систем» переименована в «Информационная безопасность», по которой в этом же году осуществлен первый выпуск бакалавров. Таким образом, кафедра осуществляет обучение студентов по двум направлениям подготовки «Радиофизика» и «Информационная безопасность».

Благодаря сотрудничеству Донецкого национального университета с ведущими вузами Российской Федерации начинает работать программа двойных дипломов, которая позволяет выпускникам получать дипломы Российских вузов, помимо дипломов ДонНУ. Таким образом, в 2015 г. 16 бакалавров по направлению подготовки «Информационная безопасность» защитили выпускные квалификационные работы и получили дипломы Российской Федерации в Донском государственном техническом университете, а 15 специалистов и 6 бакалавров по направлению подготовки «Радиофизика» - в Южном Федеральном университете.



Выпускники-безопасники кафедры в ДГТУ



Выпускники-радиофизики кафедры в ЮФУ

Многолетний опыт показывает, что выпускники кафедры радиофизики хорошо зарекомендовали себя, востребованы на рынке труда и сегодня успешно работают в различных отраслях науки и промышленности. Выдающимися выпускниками кафедры являются: Литвиненко Валентин Иванович - директор Научно-исследовательского института комплексной автоматизации; Левченко Георгий Георгиевич – член-корреспондент НАНУ, д-р физ.-мат. наук, лауреат премии им. Л.В. Шубникова; Дружинин Геннадий Михайлович - директор Донецкого научно-исследовательского института судебной экспертизы; Цирельсон Владимир Григорьевич – заведующий кафедрой квантовой химии РХТУ, д-р физ.-мат. наук, лауреат премии им. Гумбольдта. Сегодня выпускники кафедры работают в таких цифровых гигантах, как «Яндекс», «ВКонтакте», «Лаборатория Касперского».

Приказом ректора ДонНУ Беспаловой Светланы Владимировны №155/05 от 31.08.2016 г. по инициативе декана Физико-технического факультета, заведующего кафедрой радиофизики Данилова Владимира Васильевича, в связи с тенденциями развития технологий и появлением новых направлений научной деятельности кафедра радиофизики переименована в кафедру радиофизики и инфокоммуникационных технологий (РФиИКТ).

В период с 2016 по 2020 гг. под руководством доктора технических наук, профессора Данилова В.В. сотрудниками кафедры проведены научные исследования и получены результаты в области разработки высокоэффективных передатчиков телекоммуникационной аппаратуры и высокоэффективных транзисторных усилителей мощности, моделирования защищенных инфокоммуникационных систем, диагностики и контроля структуры конструкционных материалов, взаимодействия упругих волн с нарушениями среды распространения, автоматизации процессов научных исследований. Исследования велись как в рамках госбюджетных, так и инициативных НИР кафедры. К исследованиям активно привлекались аспиранты кафедры, а также магистранты и студенты.

С 2018 года на кафедре РФиИКТ, совместно с кафедрой физики неравновесных процессов, метрологии и экологии имени И. Л. Повха [3], издается научный журнал «Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки» [4]. Сегодня журнал занимает высокую позицию в перечне рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК РФ), а в состав редколлегии журнала входят ведущие ученые Российского научно-образовательного пространства таких организаций, как Московский энергетический институт, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова.

В 2019-2020 гг. коллективом кафедры проделан колоссальный труд по подготовке магистерских программ для прохождения государственной аккредитации в Федеральной службе по надзору в сфере образования и науки, что позволило получать дипломы Российской Федерации в Донецком национальном университете.

В 2022 г. наступает очередной трудный период, не смотря на который кафедра продолжила работу. Весь профессорско-преподавательский и учебно-вспомогательный состав сохранился, хоть и имела место быть небольшая естественная текучесть кадров. Так, к естественной текучести кадров можно отнести выход на заслуженную многолетним трудом пенсию старшего преподавателя, выпускницы кафедры 1970 года (1-ый выпуск ДонГУ) Деркаченко Елены Васильевны.

Научный потенциал кафедры удалось не только сохранить, но и в 2022 г. открыть новое научное направление - исследование каналов побочных электромагнитных излучений и наводок элементов и устройств офисной вычислительной техники посредством автоматизированных систем радиоконтроля, радиомониторинга и научных исследований радиосигналов, по которому открыта и по сегодняшний день выполняется госбюджетная НИР.

В 2023 году университет возвращает свое историческое название «Государственный» (приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации №338 от 30 марта 2023 г. Донецкий национальный университет переименован в Донецкий государственный университет) и полностью переходит в подчинение Минобрнауки России.

14 ноября 2024 г. коллектив кафедры скоростно покидает кандидат физико-математических наук, доцент Тимченко Владимир Иванович, проработавший на кафедре более 7 лет [5].

С сентября 2025 г. кафедрой радиофизики и инфокоммуникационных технологий руководит выпускник кафедры 2015 года, кандидат технических наук, доцент Третьяков Игорь Александрович.



канд. техн. наук, доцент
Третьяков Игорь Александрович

Третьяков Игорь Александрович родился 26 июля 1991 г. в г. Донецке. В 2015 г. окончил Физико-технический факультет Донецкого национального университета, получив квалификацию магистра по специальности «Радиофизика и электроника».

Трудовой путь начал в 2015 году в должности лаборанта кафедры радиофизики Донецкого национального университета. В период с 2015 по 2018 гг. обучался в аспирантуре ДонНУ по специальности «Радиофизика», в этот же период работал по совместительству старшим лаборантом и ассистентом, а с 2019 г. - заведующим учебной лаборатории той же кафедры.

В 2020 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности «Автоматизация и управление производственными процессами и производствами (по отраслям)», с сентября 2021 г. - доцент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий. В 2024 году присвоено ученое звание доцента по специальности «Методы и системы защиты информации, информационная безопасность».

С сентября 2025 г. избран на должность заведующего кафедрой РФиИКТ.

Третьяков И.А. – автор более 100 научных работ и более 10 учебных и учебно-методических пособий. Кроме того, является заместителем главного редактора научного журнала «Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки».

Сегодня средний возраст сотрудников кафедры – 47 лет, процент молодых ученых (до 39 лет) – 50%. Так, сегодня кафедра РФиИКТ представлена следующим коллективом:
профессора – Данилов Владимир Васильевич, Любчанский Игорь Леонидович, Малащенко Вадим Викторович;

доценты – Бабичева Маргарита Вадимовна, Третьяков Игорь Александрович, Худяков Игорь Иванович, Шелехова Ольга Георгиевна;

старшие преподаватели – Белик Татьяна Владимировна, Долбещенков Вячеслав Васильевич, Долбещенкова Наталья Вячеславовна, Кожекина Елена Николаевна, Рушечников Ярослав Иванович;

заведующие учебными лабораториями – Балко Владислав Сергеевич, Джанджгава Карина Геннадьевна, Подлесный Владимир Юрьевич, Стародубцев Юрий Александрович;

лаборанты, старшие лаборанты – Заболотный Кирилл Валентинович, Колесник Екатерина Витальевна, Кутарский Андрей Алексеевич, Миронова Людмила Владимировна.

За последние 5 лет коллективом кафедры подготовлено и опубликовано более 100 научных статей в изданиях, которые индексируются в международных наукометрических базах данных (Scopus, Web of Science, РИНЦ, Index Copernicus, ADS, CAS, Ulrich, Springer и др.), более 150 тезисов докладов в материалах республиканских и международных научных конференций. В том числе в соавторстве со студентами и аспирантами опубликовано около 50 научных статей и 25 тезисов докладов в материалах конференций. Кроме того, подана первая за долгие годы заявка на регистрацию результата интеллектуальной деятельности – программы для ЭВМ.

В 2025 году кафедра РФиИКТ вместе с Физико-техническим факультетом [6] отметила свое 60-летие. Несмотря на нынешние трудности и вызовы, есть все основания считать, что к очередному юбилею коллектив кафедры подошел с богатым опытом и полным амбиций: наблюдается приток молодых и талантливых кадров, появляются и реализуются новые идеи, готовятся и защищаются кандидатские диссертации.

Заведующий кафедрой РФиИКТ,
канд. техн. наук, доц. Третьяков И.А.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Третьяков, И. А. 55-летию кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий / И. А. Третьяков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2020. – № 4. – С. 78-85. – EDN AQRNCR.
2. 75-летнему юбилею Владимира Васильевича Данилова // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 3. – С. 62-63. – EDN XUKVLW.
3. 55-летию кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии имени Ивана Лукича Повха // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2020. – № 4. – С. 86-91. – EDN VZDTDD.
4. Третьяков, И. А. 5-летию деятельности редакции научного журнала "Вестник ДонНУ. Серия Г: Технические науки" / И. А. Третьяков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 1. – С. 70-91. – EDN SGLATW.
5. Памяти Владимира Ивановича Тимченко // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 4. – С. 251-252. – EDN OHNDNX.
6. Третьяков, И. А. Физтеху - 60 / И. А. Третьяков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2025. – № 2. – С. 187-197. – EDN DXUAJF.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. Редакция журнала «Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки» принимает к рассмотрению на предмет опубликования в журнале ранее не опубликованные и не представленные для одновременной публикации в других изданиях научные статьи по тематике журнала.
2. Авторы статей несут персональную ответственность за наличие элементов плагиата в текстах статей, за полноту и достоверность изложенных фактов и положений, за факт их публикации. Допускается публикация не более двух статей от одного автора в одном номере и наличие не более пяти авторов одной статьи. Один из авторов должен иметь ученую степень. Гонорар не выплачивается и плата за публикацию статей не взимается.
3. Авторами представляется рукопись статьи в одном экземпляре (на русском или английском языке), напечатанном с одной стороны листа бумаги формата А4 (экземпляр подписывается авторами). Страницы рукописи должны быть последовательно пронумерованы. Объем рукописи, как правило, от 5 до 15 страниц (для обзорной статьи – до 25), включая рисунки, таблицы, список источников, сведения об авторах. Вместе с рукописью на адрес электронной почты vestnik.g@mail.ru высылается электронный вариант с полным текстом статьи в формате doc или docx. При отсутствии возможности предоставления в редколлегию рукописи, на электронную почту редакции высылается полный текст статьи в формате pdf. Статьи, не соответствующие Правилам для авторов или тематике журнала, к рассмотрению не принимаются. Все статьи, принятые к рассмотрению, подвергаются рецензированию и в случае положительной рецензии – научному и техническому редактированию.
4. Решение о публикации, публикации после доработки/переработки или отклонении статьи принимается редакционной коллегией журнала. Если статья рекомендуется к публикации после небольшой авторской доработки, редакция направляет авторам статьи замечания (без указания рецензента). Статья, направленная авторам на доработку, должна быть возвращена в исправленном виде в максимально короткий срок. К доработанной статье необходимо предоставить письмо от авторов, содержащее ответы на все замечания и поясняющие все изменения, сделанные в статье. В случае отклонения статьи редакция направляет авторам рецензию (без указания рецензента) или выдержки из нее, либо аргументированное письмо редактора. Редакция не вступает в дискуссию с авторами отклоненных статей, за исключением случаев явного недоразумения.
5. Обязательные требования к оформлению статей:
 - **Размер бумаги:** А4.
 - **Ориентация:** книжная.
 - **Поля:** зеркальные, верхнее – 30 мм, нижнее – 30 мм, внутри – 30 мм, снаружи – 20 мм.
 - **Положение верхнего и нижнего колонтитула относительно края:** 2 см.
 - **Междустрочный интервал:** одинарный.
 - **Абзацный отступ:** 1 см.
 - **Основной текст статьи:** шрифт Times New Roman, размер 12 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.
 - **Аннотация, список источников, сведения об авторах:** шрифт Times New Roman, размер 10 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.
 - **Подписи, заглавие и содержание таблиц:** шрифт Times New Roman, размер 10 пт., с выравниванием по центру, без автоматической расстановки переносов.

6. Текст статьи должен соответствовать следующей структурной схеме:

- **Первая строка:** индекс УДК – выравнивание по левому краю, без абзацного отступа.
- **Через строку:** **НАЗВАНИЕ** статьи – полужирный, выравнивание по центру, прописными буквами, без переноса слов, без абзацного отступа.
- **Через строку:** копирайт © и год – полужирный, выравнивание по левому краю, без точки после года, через 3 пробела **фамилия(и) и инициалы автора(ов)** – полужирный, курсив, выравнивание по левому краю, без абзацного отступа.
- **Через две строки:** аннотация объемом до 100 слов, кратко отражающая предмет статьи, примененные методы исследований и основные результаты, полученные авторами.
- **На следующей строке:** словосочетание **Ключевые слова:** – полужирный, курсив. Далее приводятся ключевые слова количеством до 10 слов, отделяемых друг от друга запятой. Блок аннотация и ключевые слова рекомендуется отделять от основного текста с помощью инструмента «Границы».
- **Через две строки:** основной текст статьи, который содержит введение, основную часть и выводы. Во **введении** рекомендуется излагать постановку проблемы в общем виде и связь с важнейшими научными и практическими задачами, анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена статья, формулировку целей статьи. В **основной части** рекомендуется излагать основные материалы исследования с полным обоснованием полученных научных результатов. Основную часть рекомендуется структурировать на разделы с названиями, отражающими их содержание (например: постановка задачи; методы ее решения; анализ полученных результатов). В **выводах** рекомендуется кратко и четко подводить итоги основных результатов, полученных авторами и описывать перспективы дальнейших исследований в данном направлении.
- **Через строку:** словосочетание **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ** размером 10 пт., полужирный, выравнивание по левому краю, прописными буквами, без абзацного отступа. Далее через строку с абзацным выступом 0,5 см приводится нумерованный перечень используемых источников общим списком в порядке упоминания в тексте на языке оригинала в соответствии с ГОСТ Р 7.0.100–2018 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Ссылка на источник приводится в квадратных скобках. Разрешается ссылаться только на опубликованные работы. Необходимо наличие источников последних 5-10 лет по исследуемому вопросу.
- **Через строку:** надпись «Поступила в редакцию *xx.xx.20xx г.*, рекомендована к печати *xx.xx.20xx г.*» размером 10 пт., курсив, выравнивание по правому краю.
- **Через строку:** приводится **НАЗВАНИЕ** статьи, **фамилия(и) и инициалы автора(ов)**, аннотация и ключевые слова (**Keywords**) на английском языке (перевод) размером 10 пт.
- **Через строку:** сведения об авторах размером 10 пт., в таблице с параметром «Нет границ», содержащей два столбца (для сведений на русском и английском языках):
 - **Фамилия, имя, отчество;**
 - ученая степень, ученое звание, должность, с указанием организации (в соответствии с уставом), которую представляет автор;
 - страна, город;
 - адрес электронной почты.

7. Образец оформления статьи:

УДК 681.5:621.37

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В АСНИ РАДИОСИГНАЛОВ

© 2025 Третьяков И.А., Данилов В.В.

В данной работе приведены описания элементов устройств вычислительной техники для создания специализированных автоматизированных систем научных исследований контроля радиообстановки на основе фотонного эхо-эффекта. Показано, что комбинирование оптических и радиотехнических ...

Ключевые слова: обработка радиосигналов, оптические методы, АСНИ, радиообстановка.

Введение. Важнейшим элементом современной концепции [1-3] ...

Механизм формирования сигналов. Несмотря на принципиальное [4] ...

Выводы. Таким образом, не смотря на сложность протекающих процессов ...

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Третьяков, И. А. Элементы устройств вычислительной техники для АСНИ контроля радиообстановки на основе эхо-эффекта / И. А. Третьяков, В. В. Данилов, С. В. Борщевский // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 1. – С. 34-39. – EDN CADMAM.
2. Разработка автономной автоматизированной системы непрерывного контроля состояния строительного объекта / В. Ю. Подлесный, В. И. Тимченко, И. А. Третьяков [и др.] // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 51-59. – EDN PHCERN.
3. Автоматизированные системы научных исследований [Электронный ресурс] / Studbooks : [Сайт]. – URL: <https://studbooks.net/1386372/> (дата обращения 25.01.2025).

Поступила в редакцию xx.xx.2025 г., рекомендована к печати xx.xx.2025 г.

APPLICATION OF OPTICAL INFORMATION PROCESSING METHODS IN ASRS OF SIGNALS

Tretiakov I.A., Danilov V.V.

This paper describes the elements of computer technology devices for the creation of specialized automated systems for scientific research of radio control based on the photonic echo effect. It is shown that the combination of optical and radio engineering ...

Keywords: radio signal processing, optical methods, ASRS, radio substitution.

Третьяков Игорь Александрович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоп физики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: i.tretiakov@mail.ru

Tretiakov Igor Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

Данилов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоп физики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: ut5iv@mail.ru

Danilov Vladimir Vasilevich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

8. Рисунки и таблицы располагаются по тексту строго в пределах печатного поля книжной ориентации страниц после их первого упоминания в тексте статьи. Вся текстовая информация на рисунках должна быть четкой и разборчивой и не иметь лишних деталей. Каждый рисунок должен иметь подрисуночную подпись (не совмещенную с рисунком) в формате: «Рис. №. Название». Каждая таблица должна иметь заглавие в формате: «Таблица №. Название». Во избежание смещений рисунков рекомендуется размещать их в таблицах с двумя строками с параметром «Нет границ» (в первой строке размещается рисунок, во второй - подрисуночная подпись). Все рисунки и таблицы должны быть последовательно пронумерованы арабскими цифрами, допускается применение букв при нумерации рисунков, состоящих из нескольких частей. Сканированные рисунки не допускаются. Образец оформления рисунка и таблицы:

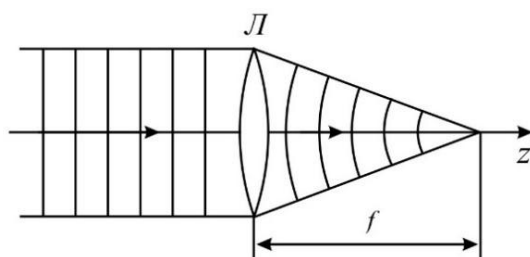


Рис. 1. Действие линзы на плоскую волну

Таблица 1. Номиналы элементов схемы УМ класса F₃

Элемент	Номинал	Единица измерения
C _{out}	25	пФ
C ₁	10	нФ
C ₂	100	мкФ
L ₁	150	мкГн
L ₂	460	нГн
L ₃	765	нГн
R ₁	0,39	МОм

9. Формулы выравниваются по центру и имеют, при необходимости, сквозную нумерацию по правому краю. Для выравнивания формул рекомендуется использовать таблицы с параметром «Нет границ». После формул ставится тот знак препинания, который необходим исходя из построения фразы. Нумеровать следует только те формулы, на которые имеются ссылки в тексте. Ссылки на формулы приводятся в круглых скобках. Каждая формула отделяется от основного текста интервалом в 6 пт. перед и после. Формулы, их компоненты и все переменные в тексте и отдельно в строках набираются только с помощью редакторов формул Microsoft Equation 3.0 или MathType 5.0 и выше с параметрами:

- **текст и переменная:** наклонный;
- **матрица-вектор:** полужирный наклонный;
- **размер:** обычный - 12 пт., крупный индекс - 9 пт., мелкий индекс - 7 пт., крупный символ - 18 пт., мелкий символ - 12 пт.

Образец оформления формулы:

$$y_t = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i y_{t-i} + b \xi_t \quad (1)$$

10. Материалы предоставляются по адресу:

283001, Российская Федерация, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, пр. Театральный, д. 13, Физико-технический факультет.

Главный редактор: Данилов Владимир Васильевич, каб. 203.

Зам. главного редактора: Третьяков Игорь Александрович, каб. 210.

Ответственный секретарь: Пометун Екатерина Дмитриевна, каб. 001.

Контактный тел.: +7 (856) 302 07 81

E-mail: vestnik.g@mail.ru

Научное издание

**Вестник Донецкого национального университета.
Серия Г: Технические науки**

– 2025. – № 3.

Научное и техническое редактирование: И.А. Третьяков, Е.Д. Пометун

Адрес редакции:

ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
283001, Российская Федерация, ДНР, г. Донецк, пр. Театральный, д. 13.

E-mail: vestnik.g@mail.ru

URL: <http://donnu.ru/vestnikG>

Подписано к изданию 03.09.2025 г.

Адрес издателя: Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
125009, г. Москва, вн.тер.г. Муниципальный Округ Тверской, ул. Тверская, д. 11, стр. 1;

Издательство ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
283001, Российская Федерация, ДНР, г. Донецк, ул. Университетская, д. 24.