

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

**Журнал Сибирского
федерального университета
Техника и технологии**

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

2026 19 (2)

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

2026 19(2)

Журнал Сибирского федерального университета Техника и технологии

Journal of Siberian Federal University Engineering & Technologies

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

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

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

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

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

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

№ 2. 25.03.2026. Индекс: 42328. Тираж: 1000 экз.

Свободная цена

Адрес редакции и издательства:
660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 82, стр. 24, ауд. 117.

Отпечатано в типографии Издательства БИК СФУ
660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 82а.

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

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

Подписано в печать 16.03.2026. Формат 60x90/8. Усл. печ. л. 11,7.
Уч.-изд. л. 11,2. Бумага тип. Печать офсетная. Тираж 1000 экз. Заказ № 25978.

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

CHIEF EDITOR

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

EDITORIAL BOARD

- Sergey Alekseenko, Academician of RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Institute of Thermophysics RAS, Siberian Branch, Novosibirsk, Russia;
- Sereeter Batmönkh, Academician of the Mongolian Academy of Sciences, Dr. of Tech., Prof., Institute of Heat Engineering and Industrial Ecology Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia;
- Yuri Galerkin, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia;
- Eugene Garin, Dr. of Tech., Prof., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;
- Alexander Zavorin, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Honored Worker of the Ministry of Fuel and Energy of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia; ORCID 0000-0001-5724-0150;
- Vladimir Zuev, Corresponding member RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of RAS, Siberian Branch, Tomsk, Russia; ORCID 0000-0002-1271-1200;
- Sergey Ivanov, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Transbaikalian State University, Chita, Russia;
- Yuriy Koziratzky, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Military Education and Research Centre of Military-Air Forces «Military-Air Academy name after N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin», Voronezh, Russia;
- Genius Kuznetsov, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Dr. Phys.-Math., Prof., Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia;
- Tatiana Kulagina, Honorary Worker of Education of the Russian Federation, Expert of the Russian Academy of Sciences, Dr. of Tech., Prof., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0001-6165-6474;
- Feng-Chen Li, Prof. Dr. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin, China; ORCID 0000-0003-2580-928X;
- Dmitriy Markovich, Academician of RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Institute of Thermophysics RAS, Siberian Branch, Novosibirsk, Russia; ORCID 0000-0002-1348-1806;
- Andrey Minakov, Dr. Phys.-Math., Prof., Siberian Federal University, Institute of Thermophysics of RAS, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0003-1956-5506;
- Valery Mironov, Corresponding member RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC RAS, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0001-7877-9817;
- Vladimir Moskvichev, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Krasnoyarsk Branch of the Federal Research Center for Information and Computing Technologies, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0001-7072-2250;
- Bernard Nacke, Dr. of Tech., Prof., Institute of Electrotechnology Leibniz University, Hannover, Germany;
- Valeriy Nikulin, Honored Scientist of the Udmurt Republic, Honored Engineer of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Kamsk Institute of Humanitarian and Engineering Technologies, Izhevsk, Russia;
- Oleg Ostrovski, Dr. of Tech., Prof., University of New South Wales, Australia;
- Harald Oye, Dr. of Tech., Prof., Norwegian University of Science and Technology, Oslo, Norway;
- Vasili Pantelev, Honorary Worker of Science and technicians of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia; Scopus ID: 57205124847;
- Petr Polyakov, Honored Metallurgist of the RSFSR, Dr. of Tech., Prof., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;
- Miloš Stanković, Prof. Dr., Institute of Applied Sciences, Beograd, Srbija; ORCID 0000-0001-9767-5634;
- Valery Stennikov, Academician of RAS, Dr. of Tech., Prof., Melentiev Energy Systems Institute RAS, Siberian Branch, Irkutsk, Russia, ORCID 0000-0001-6219-0354;
- Viktor Tsubulsky, Dr. Tech., Ch. Scientific Co-worker, National Research Center «Kurchatov Institute», Institute of Economic Forecasting RAS, Moscow, Russia, ORCID 0000-0002-7739-9393;
- Ibragim Khisameev, Corresponding member of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Dr. of Tech., Prof., Kazan State Technological University, Kazan, Russia;
- Nikolai Zuglenok, Corresponding member RAS, Dr. of Tech., Prof., Federal Research Center KSC RAS, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia;
- Vladimir Shaidurov, Academician of RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Institute of Computational Modelling Federal Research Center KSC RAS, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0002-7883-5804
- Anatoly Shvidenko, Doctor of Agricultural Science, Prof., International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.

CONTENTS

Researching. Design. Operating Experience

- Vladimir A. Kulagin, Alexander S. Nikiforov,
Evgeny V. Prikhodko and Nazgul M. Aripova**
Development of a Method for Monitoring the Process of Heating The Lining of High-Temperature Units... **144**
- Anna V. Nechaeva,
Vadimir V. Shalagaev and Aleksander S. Zavorin**
Relationship Between Thermophysical Properties of Carbon Pipe Steel
and Hydrogen-Induced Structural Transformations..... **154**
- Marat M. Gafurov,
Tatiana A. Kulagina and Tatiana A. P'yanykh**
Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer in a Ranque-Hilsch Vortex Tube..... **164**
- Stutya G. Bayakin,
Nikolay V. Tsuglenok and Tatiana A. P'yanykh**
The Second Law of Thermodynamics, in its Current Form,
and Low-Temperature Energy Generation in the Arctic Zone **172**
- Kholmahmad I. Kholov**
Comparative Characteristics of Gold Extraction Methods (Cyanide, Thiosulfate, Thiourea, Chloride)..... **182**
- Stanislav S. Tulenin, Sofia K. Shvarts, Anastasia A. Andreeva,
Olga M. Izotova, Ekaterina D. Bocharova, Natalia Yu. Igoshkina**
Sintesis Precipitates and Films of Zirconium Dioxide from a Urotripine System..... **202**
- Ilia V. Lapin,
Alexander S. Zakharov, Ilfar M. Gilmutdinov**
Modeling the Process of Pressing Powdered Aluminum with Calcium Carbonate **216**
- Nuriddin N. Irgashev**
Stochastic Modeling and Error Analysis of Infrared Sensors in Axle-Box Heating Control Systems **224**
- Igor V. Naumov, Sergey V. Podyachikh,
Dmitrii A. Ivanov, B. Zh. Ntsama Ndi and David S. Ermolaev**
Assessment of the Unbalanced Operating Modes Stability
of Low Voltage Power Supply System Components **238**
- Oleg V. Vasiliev, Alexander A. Kuchin,
Kirill V. Parfenov, Irina A. Savelieva and Andrey A. Philonov**
Method for Identifying Simulated Interference in a Pulse – Doppler Active Radar Homing Head
of an Air-to-Air Missile When It Is Aimed at a Helicopter..... **260**
- Mikhail N. Bogdanov, Alexander S. Golovachev,
Alexey Y. Kovalenko, Alexey A. Tolmachev and Igor V. Lutikov**
Navigation System's Model with the Possibility of Implementing Deferred Processing
for Measurements of Current Navigation Parameters..... **272**

СОДЕРЖАНИЕ

Исследования. Проектирование. Опыт эксплуатации

В. А. Кулагин, А. С. Никифоров, Е. В. Приходько, Н. М. Арипова Разработка способа контроля процесса разогрева футеровок высокотемпературных агрегатов.....	144
А. В. Нечаева, В. В. Шалагаев, А. С. Заворин Связь теплофизических свойств трубной углеродистой стали с водород-индуцированными трансформациями структуры.....	154
М. М. Гафуров, Т. А. Кулагина, Т. А. Пьяных Численное моделирование процесса тепломассообмена в вихревой трубке Ранка-Хилша	164
С. Г. Баякин, Н. В. Цугленок, Т. А. Пьяных Второй закон термодинамики в актуальном изложении и перспектива низкотемпературной энергогенерации	172
Х. И. Холов Сравнительная характеристика методов извлечения золота (цианид, тиосульфат, тиомочевина, хлорид).....	182
С. С. Туленин, С. К. Шварц, А. А. Андреева, О. М. Изотова, Е. Д. Бочарова, Н. Ю. Игошкина Получение осадков и пленок диоксида циркония из уротропиновой системы	202
И. В. Лапин, А. С. Захаров, И. М. Гильмутдинов Моделирование процесса прессования порошкового алюминия с карбонатом кальция	216
Н. Н. Иргашев Стохастическое моделирование и анализ погрешностей инфракрасных датчиков в системах контроля нагрева букс	224
И. В. Наумов, С. В. Подъячих, Д. А. Иванов, Б. Ж. Нтсама Нди, Д. С. Ермолаев Оценка устойчивости несбалансированных режимов работы компонентов систем электроснабжения низкого напряжения.....	238
О. В. Васильев, А. А. Кучин, К. В. Парфенов, И. А. Савельева, А. А. Филонов Способ идентификации имитационных помех в импульсно-доплеровской активной радиолокационной головке самонаведения ракеты «воздух-воздух» при ее наведении на вертолет.....	260
М. Н. Богданов, А. С. Головачев, А. Ю. Коваленко, А. А. Толмачев, И. В. Лютиков Модель навигационного комплекса с возможностью реализации отложенной обработки измерений текущих навигационных параметров	272

**Researching. Design.
Operating Experience**

**Исследования.
Проектирование.
Опыт эксплуатации**



Theoretical and Applied Heat Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: PVPJPI

УДК 621.1:669

**Development of a Method for Monitoring the Process
of Heating The Lining of High-Temperature Units**

**Vladimir A. Kulagin^a, Alexander S. Nikiforov^b,
Evgeny V. Prikhodko^{b*} and Nazgul M. Aripova^b**

^aSiberian Federal University

Krasnoyarsk, Russian Federation

^bPavlodar State University named after S. Toraigyrov

Pavlodar, Kazakhstan

Received 16.01.2026, received in revised form 26.01.2026, accepted 28.01.2026

Abstract. The paper presents the results of the development of a method for monitoring the thermal condition of the lining of a high-temperature unit. The developed method makes it possible to obtain temperature values along the lining section during heating and cooling of the unit. Based on a comparison of the magnitude of the largest temperature difference across the cross-section and the maximum temperature difference at which the resulting thermal stresses do not exceed the tensile strength of the refractory materials used, the rate of temperature change of the lining of a high-temperature unit is estimated. This makes it possible to conduct non-stationary thermal processes at the highest possible speeds without calculating the values of temperature stresses. The calculation of temperature fields in the lining is based on data on the temperature of the outer surface of the lining and the temperature of the process material. The developed method does not imply a violation of the integrity of the lining when installing temperature sensors in them. The method involves using an accessible mathematical model, which can be implemented in any development environment, including the Excel program.

Keywords: lining, control of the heating process, refractories, temperature stresses.

Citation: Kulagin V. A., Nikiforov A. S., Prikhodko E. V., Aripova N. M. Development of a Method for Monitoring the Process of Heating The Lining of High-Temperature Units. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(2), 144–153. EDN: PVPJPI



© Siberian Federal University. All rights reserved

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

* Corresponding author E-mail address: john1380@mail.ru

Разработка способа контроля процесса разогрева футеровок высокотемпературных агрегатов

**В. А. Кулагин^а, А. С. Никифоров^б,
Е. В. Приходько^б, Н. М. Арипова^б**
*^аСибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск
^бТорайгыров университет
Казахстан, Павлодар*

Аннотация. В работе представлены результаты разработки способа контроля теплового состояния футеровки высокотемпературного агрегата. Разработанный способ позволяет получать значения температур по сечению футеровки в процессе нагрева и охлаждения агрегата. На основании сравнения величины наибольшего перепада температур по сечению и максимальной разности температур, при которой возникающие термические напряжения не превышают предела прочности используемых огнеупорных материалов, оценивают величину скорости изменения температуры футеровки высокотемпературного агрегата. Это позволяет без расчёта значений температурных напряжений вести нестационарные тепловые процессы с максимально возможными скоростями. Расчёт температурных полей в футеровке производится на основании данных о температуре внешней поверхности футеровки и температуре технологического материала. Разработанный способ не предполагает нарушения целостности футеровки при установке в них датчиков температуры. Способ включает использование доступной математической модели, реализация которой возможна в любой среде разработки, включая программу Excel.

Ключевые слова: футеровка, контроль процесса разогрева, огнеупоры, температурные напряжения.

Цитирование: Кулагин В. А. Разработка способа контроля процесса разогрева футеровок высокотемпературных агрегатов / В. А. Кулагин, А. С. Никифоров, Е. В. Приходько, Н. М. Арипова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(2). С. 144–153. EDN: PVRJPI

Введение

Основу корпусов высокотемпературных агрегатов составляют футеровки (обмуровки) – защитные конструкции, предназначенные для удержания технологического материала в рабочем пространстве агрегата и снижения тепловых потерь. Конструкция футеровки чаще всего представляет собой кладку из отдельных фасонных огнеупоров. Анализ условий эксплуатации высокотемпературных агрегатов показал, что разрушение футеровки происходит по ряду причин [1–3]:

- воздействие температурных напряжений, вызванных перепадом температур по сечению футеровки;
- воздействие химически агрессивного технологического материала;
- механическое воздействие на огнеупоры.

Разрушения обмуровки высокотемпературных агрегатов будут приводить:

- к возможности аварийной ситуации с выходом технологического материала за пределы рабочего пространства агрегата;
- к повышению потерь теплоты в окружающую среду;

– к увеличению загрязнения технологического материала веществом огнеупорного слоя.

В большинстве случаев для агрегатов периодического действия значительные температурные напряжения являются главной причиной разрушения футеровок [4–6].

Контроль за состоянием футеровки в процессе работы высокотемпературного агрегата – сложная задача, решение которой порой сводится к оценке возможности протечки, а не к предотвращению процесса разрушения.

Кроме частых нестационарных тепловых процессов (для агрегатов периодического действия) ситуация усугубляется растворением части огнеупоров в технологическом материале и пропиткой огнеупоров технологическим материалом, изменением теплофизических и термомеханических свойств огнеупоров от температуры и от условий эксплуатации и др.

В технической литературе выделяются следующие основные методы диагностики состояния футеровки [7].

Во-первых, это теплотехнический метод. Этот метод предполагает разработку математической модели теплового состояния футеровки в процессе эксплуатации. Для применения математической модели к конкретным условиям необходимо установление начальных и граничных условий, которые устанавливаются посредством замеров температур датчиками, размещёнными на поверхности и внутри футеровки.

Данный способ имеет следующие недостатки:

– расположение термопары внутри футеровки нарушает её целостность и может привести к аварийным ситуациям;

– способ не предполагает учёта изменения теплофизических и термомеханических свойств огнеупорных материалов в процессе эксплуатации.

Так, авторами [8] разработан комплекс, производящий непрерывное измерение температуры в футеровке на границе её слоёв. Измеренные температуры сравниваются с уставками, которые вычисляются на основе стационарной модели теплопроводности. Разработанная схема позволяет проводить мониторинг теплового состояния футеровки и производить отключение печи в аварийных ситуациях. Кроме размещения термопар непосредственно в футеровке к недостаткам способа стоит отнести использование стационарной модели теплопроводности. Использование стационарной теплопроводности при работе индукционной печи – агрегата периодического действия, будет давать значительные погрешности при переходных тепловых процессах.

Авторы работы [9] оценили глубину, на которую можно безопасно устанавливать датчики температуры. Это значение составляет не более 5 см от поверхности нагрева. Указаны также зоны и частота расположения датчиков – не реже чем через 10 м.

Разновидностью данного способа является способ контроля состояния футеровки посредством размещения термопар в футеровке (на фиксированной глубине) или на внешней поверхности футеровки и дальнейшей оценки состояния футеровки по их показаниям. По увеличению показаний термопары до предельных значений судят о необходимости вывода агрегата в ремонт. Величину предельного значения температуры, до которой можно продолжать эксплуатацию, определяют опытным путём [10].

Во-вторых, электрические методы контроля. Использование электрических методов теплового контроля футеровки также предполагает использование датчиков глубины. Так, авто-

рами [11] создан ряд электрических методов контроля, работа которых основана на функционировании электрической цепи по мере износа огнеупора. Нарушение целостности огнеупоров при установке в них контрольных датчиков является недостатком, снижающим надёжность работы высокотемпературного агрегата.

В-третьих, ультразвуковой метод. Для исключения воздействия на футеровку при установке контрольных датчиков может быть использован метод контроля с использованием ультразвуковых сигналов. В статье [12] представлена система неразрушающего контроля остаточной толщины огнеупорной кладки высокотемпературных агрегатов. В её основе – метод отражённого акустико-ультразвукового сигнала (АУ–Е). Система предназначена для совместной работы с использованием закладных термопар и определения положения трещин и пустот. К недостаткам метода можно отнести сложности измерения и необходимость высокой квалификации персонала. Кроме этого, ограничение на применение ультразвуковых датчиков по температуре не позволяет использовать данный метод для ряда высокотемпературных агрегатов.

В-четвёртых, радиационный метод. Он является одним из самых сложных способов неразрушающего контроля футеровки при реализации. Износ огнеупоров, содержащих изотоп, изменяет интенсивность излучения на наружной поверхности высокотемпературного агрегата [13]. По величине уровня излучения судят о толщине футеровки. Сложность, высокая стоимость и необходимость подготовки обслуживающего персонала высокого уровня привели к тому, что в настоящее время его применение свелось к минимуму.

Другие способы: аналитический (оценка работоспособности агрегата основывается на материальном и тепловом балансе процесса); тепловизионный контроль за внешней поверхностью футеровки; взятие керн (износ футеровки агрегата производится по результатам анализа керн и температурам) и т.д.

За последние годы расширилась сфера применения тепловизионного контроля за состоянием футеровок. Тепловизионные снимки внешней поверхности футеровки анализируются, на основании тепловых расчётов производится оценка вероятности прогара и значения температуры технологического материала. Способ апробирован на ряде агрегатов, например, использование его для разливочных ковшей [14] позволяет проводить динамические измерения температурных полей.

Но использование тепловизионного способа предполагает высокие затраты на оборудование. Так, для теплового контроля разливочных ковшей [15] предлагается установить пять тепловизионных модулей для просмотра поверхности сталеразливочных ковшей и один пирометрический блок для оценки теплосодержания. Кроме этого, погрешности будут вносить условия эксплуатации ковшей: пропитка огнеупоров технологическим материалом; возможное наличие инородных сред между тепловизором и измеряемым объектом (пар, газы, пыль и др.); изменение степени черноты поверхности футеровки и пр.

Подводя итоги проведённого анализа, можно сказать, что современные способы контроля теплового состояния футеровки высокотемпературных агрегатов имеют ограниченное применение для конкретных агрегатов (например, доменных или индукционных печей), или контроль осуществляется периодически. В ряде случаев используют способы, позволяющие только оценивать вероятность пролива металла через футеровки. Только лишь в ряде частных случаев решается задача о получении данных о распределении температур по сечению футе-

ровки во время всей эксплуатации агрегата (при стационарных и нестационарных режимах), что позволяет использовать полученные данные для прогнозирования рабочей кампании футеровки агрегата.

При этом контроль тепловых режимов в футеровке очень важен, что подтверждается нормативными документами, регламентирующими скорость изменения температуры футеровки. Так, в [16] говорится о необходимости контроля процесса сушки и разогрева футеровки 420-тонных ковшей. Скорость повышения температуры зависит от этапа сушки и разогрева и составляет от 12,5 до 27,5 °С/ч.

Таким образом поставлена задача исследования – разработка способа контроля теплового состояния футеровки высокотемпературного агрегата без нарушения целостности огнеупоров футеровки (без заглабления датчиков температуры) и без значительных финансовых затрат на оборудование.

Методология исследования

В разработанном способе было предложено проводить замер температур на внешней поверхности футеровки, без заглабления датчиков. Это может незначительно снижать точность расчёта температурных полей, но был приоритет – надёжность и безопасность работы футеровки высокотемпературного агрегата. Температуру на внутренней поверхности футеровки принимают равной температуре технологического материала, так как провести непосредственные замеры температуры футеровки на ряде высокотемпературных агрегатов затруднительно. При этом температуру технологического материала можно измерить бесконтактно, например с помощью пирометра.

Реализация

Схема измерений при реализации разработанного способа показана на рис. 1.

Футеровка высокотемпературного агрегата представляет собой стенку 1 из огнеупорного материала. Для измерения температуры внешней поверхности футеровки используют

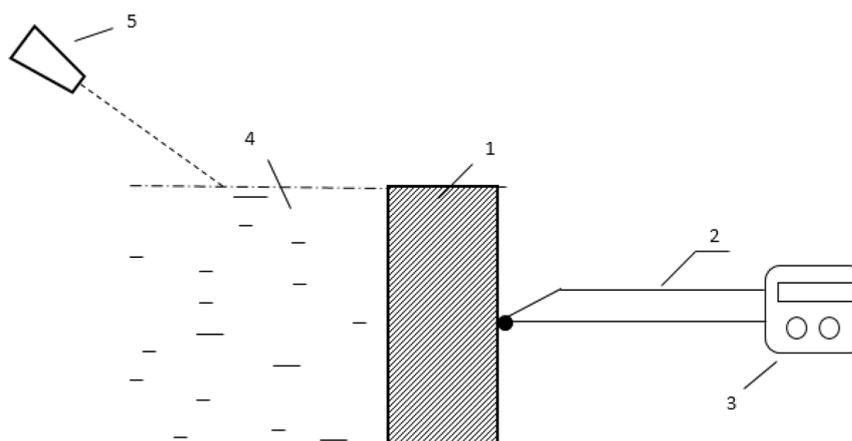


Рис. 1. Схема измерений при реализации разработанного способа

Fig. 1. Measurement scheme for implementing the developed method

датчики температуры 2, установленные на поверхности. Измерение температуры осуществляется вторичным прибором 3 на основании сигналов, формируемых датчиками температуры 2.

С внутренней стороны поверхность футеровки контактирует с технологическим материалом 4 с температурой T_0 . Температура технологического материала измеряется бесконтактным методом с помощью прибора 5.

В процессе изготовления футеровки высокотемпературного агрегата в футеровку, с её наружной стороны, устанавливают датчики температуры на поверхности футеровки.

Перед началом разогрева футеровки производят расчёт максимальной разности температур Δt , при которой возникающие термические напряжения не превышают предела прочности используемых огнеупорных материалов (то есть нет разрушения огнеупоров вследствие возникновения температурных напряжений) по формуле:

$$\Delta t = \frac{(1 - \nu) \cdot \sigma_{np}}{\alpha \cdot E},$$

где α – коэффициент линейного температурного расширения; ν – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости; σ – предел прочности используемых огнеупоров.

Подставляя в указанную формулу значение предела прочности на сжатие для используемых огнеупорных материалов получают разность температур $\Delta t_{сж}$, при которой возникающие термические напряжения сжатия не превышают предела прочности на сжатие используемых огнеупорных материалов.

Подставляя в указанную формулу значение предела прочности на растяжение для используемых огнеупорных материалов получается разность температур Δt_p , при которой возникающие термические напряжения растяжения не превышают предела прочности на растяжение используемых огнеупорных материалов.

С момента начала разогрева (τ_0) теплового агрегата (момента начала воздействия технологического материала с температурой T_0) ведут отсчёт времени разогрева. Для расчётов определяют шаг по толщине огнеупорного слоя футеровки Δy , то есть расстояние между двумя ближайшими точками огнеупорного слоя футеровки высокотемпературного агрегата, в которых будут определять температуры. Чем меньше величина шага по толщине, тем выше точность определения средней температуры футеровки.

Затем определяют шаг по времени процесса разогрева $\Delta \tau$, то есть промежуток времени, через который будут определять температуры по сечению футеровки в выбранных точках.

Первоначальное распределение температуры в футеровке принимают равным температуре внешней поверхности футеровки, измеряемой термопарой $T_1 = T_{0.с}$.

Температуру греющей среды T_0 измеряют любым доступным способом: контактными или бесконтактными способами, например пирометром. Температуру внутренней поверхности футеровки T_{n+1}^{k+1} принимают равной температуре рабочего пространства агрегата.

Затем производят расчёт значений температур по сечению футеровки высокотемпературного агрегата для момента времени τ_1 по любой разностной схеме.

Для явной четырёхточечной схемы методика расчёта будет выглядеть следующим образом. Задаются значением шага по времени процесса разогрева $\Delta \tau$ и шага по толщине огнеупорного слоя футеровки Δy .

Вычисляют коэффициенты b и f по формулам:

$$b = \frac{\alpha \Delta y}{\lambda}, \quad f = \frac{a \Delta \tau}{\Delta y^2},$$

где a – коэффициент температуропроводности, м²/с; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С); Δy – шаг по толщине огнеупорного слоя футеровки, м; $\Delta \tau$ – шаг по времени процесса разогрева, с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С).

Коэффициенты температуропроводности, теплоотдачи и теплопроводности являются справочными данными, которые находят по таблицам и диаграммам в зависимости от свойств материала и условий нагрева. В разработанном способе возможен учёт изменения теплофизических и термомеханических свойств огнеупорных материалов футеровки. Предварительные измерения свойств огнеупоров в аналогичных условиях эксплуатации позволяют создать базу данных по изменению свойств огнеупоров в процессе эксплуатации [17, 18].

Затем проверяют явную четырёхточечную схему по условию сходимости:

$$f \leq 1/[2 \cdot (1 + b)].$$

Если условие не выполняется, изменяют шаг по толщине огнеупорного слоя футеровки или времени процесса разогрева; если условие выполняется, то рассчитывают температуры по сечению в процессе разогрева от момента времени τ_0 до момента времени τ_1 с шагом по времени процесса разогрева $\Delta \tau$: k ; $k+1$; $k+2$.

Температуру всех точек (кроме точек на внутренней и внешней поверхности) по сечению в момент времени $k+1$ вычисляют по формуле

$$T_i^{k+1} = fT_{i-1}^k + (1 - 2f)T_i^k + fT_{i+1}^k.$$

Среднеарифметическое значение температур всех точек по сечению T_{cp} используется для дальнейших расчётов.

Из всех значений температур по сечению футеровки в рассматриваемый момент времени выбирают значение максимальной T_{max} и минимальной T_{min} . Значение величины возникающих термических напряжений сжатия будет пропорционально разности среднеарифметического значения температур всех точек по сечению T_{cp} и значения максимальной T_{max} температуры по сечению в рассматриваемый момент времени ΔT_{max} .

Значение величины возникающих термических напряжений растяжения будет пропорционально разности среднеарифметического значения температур всех точек по сечению T_{cp} и значения минимальной T_{min} температуры по сечению в рассматриваемый момент времени ΔT_{min} .

Разность среднеарифметического значения температур всех точек по сечению T_{cp} и значения минимальной T_{min} (или максимальной T_{max}) температуры по сечению в рассматриваемый момент времени называют наибольшим перепадом температур по сечению ΔT .

Производя сравнение величины наибольшего перепада температур по сечению ΔT и максимальной разности температур Δt , при которой возникающие термические напряжения не превышают предела прочности используемых огнеупорных материалов, оценивают величину скорости изменения температуры футеровки высокотемпературного агрегата. Если

$$0 < \frac{\Delta T}{\Delta t} \leq 1,$$

то при данной скорости величина возникающих термических напряжений ниже предела прочности используемых огнеупоров. Технологический процесс можно продолжать с этой скоростью. При этом не будет разрушения футеровки от термических напряжений.

Если

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} > 1,$$

то величина возникающих температурных напряжений превышает предел прочности огнеупоров и происходит разрушение материала. Производят снижение скорости разогрева или охлаждения агрегата.

Если

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = 0,$$

то температура по сечению футеровки одинакова, что соответствует нерабочему состоянию агрегата.

Выводы

Разработан способ контроля теплового состояния футеровки высокотемпературных агрегатов, который позволит вести тепловые процессы в высокотемпературных агрегатах со скоростями, термические напряжения при которых не приводят к разрушению огнеупорных материалов футеровки. Способ включает использование доступной математической модели, реализация которой возможна в любой среде разработки (и даже в программе Excel) и не предполагает заглубление датчиков температуры в футеровку, что повышает надёжность эксплуатации агрегатов. Способ контроля теплового состояния футеровки высокотемпературных агрегатов может применяться для контроля разогрева разливочных и промежуточных ковшей, металлургических печей и др.

Список литературы / References

- [1] Суворов С. А., Тарабанов В. Н., Козлов В. В. Эволюция износа футеровки конвертера для плавки стали // *Известия СПбГТИ (ТУ)*, 2013, № 19 (45), С. 22–26 [Suvorov S. A., Tarabanov V. N., Kozlov V. V. The evolution of the wear of the lining of the converter for melting steel // *Izvestiya SPbGTI (TU)*, 2013, № 19 (45), Pp. 22–26 (in Russian)]
- [2] Кукарцев В. А. Причины разрушения кварцитовой футеровки при эксплуатации индукционной тигельной печи и способы их предотвращения // *Заготовительное производство*, 2013, № 9, С. 7–9 [Kukartsev V. A. The causes of the destruction of quartzite lining during the operation of an induction crucible furnace and ways to prevent them // *Procurement production*, 2013, No. 9, Pp. 7–9 (in Russian)]
- [3] Котюков Т. Д., Метёлкин А. А., Шешуков О. Ю., Шевченко О. И. Анализ причин износа футеровки сталеразливочного ковша в условиях конвертерного цеха АО «ЕВРАЗ НТМК», *Молодежь и наука: материалы международной научно-практической конференции*. Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2022, 1, 197–199. [Kotyukov T. D., Metelkin A. A., Sheshukov O. Yu., Shevchenko O. I. Analysis of the causes of wear of the lining of a steel ladle in the conditions of the converter shop of JSC EVRAZ NTMK, *Youth and Science: proceedings of*

the international scientific and practical conference. Nizhny Tagil: NTI (branch) UrFU, 2022, 1, 197–199 (In Russian)]

[4] Аксельрод Л.М., Заболотский А.В. Математическое моделирование разрушения футеровок металлургического оборудования под действием термоударов // *Современная наука*, 2010, № 2 (4), С. 165–169 [Axelrod L. M., Zabolotsky A. V. Mathematical modeling of the destruction of lining of metallurgical equipment under the influence of thermal shocks // *Modern Science*, 2010, № 2 (4), Pp. 165–169 (in Russian)]

[5] Куземко Р.Д., Сущенко А.В., Курдюков А.А. Исследование факторов, влияющих на износ фурм и футеровки при заглубленной продувке расплава кислородом // *Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки.*– 1998, № 6, С. 52–61 [Kuzemko R. D., Sushchenko A. V., Kurdyukov A. A. Investigation of factors affecting the wear of tuyeres and lining during deep purging of the melt with oxygen // *Bulletin of the Azov State Technical University. Series: Technical Sciences*, 1998, No. 6, Pp. 52–61 (in Russian)]

[6] Словиковский В.В., Гуляева А.В. Эффективная коррозионно-эрозионно-стойкая футеровка вращающихся печей // *Новые огнеупоры*, 2020, № 11, С. 3–10 [Slovikovsky V. V., Gulyaeva A. V. Effective corrosion-erosion-resistant lining of rotary kilns // *New refractories*, 2020, No. 11, Pp. 3–10 (in Russian)].

[7] Савченко Г.Ю., Баюкова В.А., Вострокнутова О.Н., Леднов А.Ю., Савинова Н.А. Акустическая модель футеровки доменной печи для реализации метода собственных колебаний // *Теория и технология металлургического производства*, 2013, № 1 (13), С. 18–20 [Savchenko G. Yu., Bayukova V. A., Vostroknutova O. N., Lednov A. Yu., Savinova N. A. Acoustic model of blast furnace lining for implementation of natural oscillation method // *Theory and technology of metallurgical production*, 2013, No 1 (13), Pp. 18–20 (in Russian)]

[8] Долгих И.Ю., Марков М.Г. Разработка системы контроля состояния огнеупорной футеровки индукционной тигельной сталеплавильной печи // *Вестник ИГЭУ*, 2019, № 5, С. 58–66 [Dolgikh I. Yu., Markov M. G. Development of a system for monitoring the condition of refractory lining of an induction crucible steelmaking furnace // *Bulletin of IGEU*, 2019, No. 5, Pp. 58–66 (in Russian)]

[9] Тимошенко Д.А., Коломыцев Е.Е. Сушка футеровки тепловых агрегатов // *Новые огнеупоры*, 2013, № 12, С. 12–14 [Timoshenko D. A., Kolomytsev E. E. Drying the lining of thermal units. // *New refractories*, 2013, No. 12, Pp. 12–14 (in Russian)]

[10] Абрамчук К.В. Анализ способов мониторинга состояния футеровки индукционных тигельных печей // *Вестник науки*, 2025, № 1 (82), С. 1497–1501 [Abramchuk K. V. Analysis of methods for monitoring the condition of the lining of induction crucible furnaces // *Bulletin of Science*, 2025, No.1 (82), Pp. 1497–1501 (in Russian)]

[11] Харламов Д.А., Коберник О.П., Ансимов А.А. Методы контроля разгара огнеупорной футеровки в промышленных печах // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 6. С. 877–879. [Kharlamov D. A., Kobernik O. P., Ansimov A. A. Methods of control of the peak refractory lining of industrial furnaces. *Fundamental research*, 2013, No. 6, Pp. 877–879 (in Russian)]

[12] Gordon Y. M., Sadri A., Mironov K. V. et al. Diagnostics of blast-furnace linings // *Steel Transl.*, 2017, No 47, Pp. 517–522.

[13] Moutinho A. Control of refractory lining wear by using radioisotopes // *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part A. Applied Radiation and Isotopes*, 1988, Vol. 39, Is. 12, Pp 1265–1267.

[14] Рыбаков А.Г., Коробейников С.М., Цуприк Л.С. Применение теплового неразрушающего контроля футеровки миксеров для перевозки жидкого чугуна с помощью стационарных тепловизионных камер // *Современные научные исследования и инновации*. 2015. № 6. Ч. 1 [Rybakov A. G., Korobeynikov S. M., Tsuprik L. S. Thermal nondestructive testing application for liquid iron transportation mixer lining control via stationary thermal cameras // *Modern scientific researches and innovations*. 2015. № 6. P. 1 [Electronic journal] (in Russian)]

[15] Системы контроля зон возможного прогара футеровки сталеналивочных ковшей. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://ntc-pribor.ru/project/38-sistemy-kontrolya-zon-vozmozhnogo-progara-futerovki-stalenalivochnyh-kovshey.html> [Control systems for zones of possible burnout of the lining of steel ladles – Access: <http://ntc-pribor.ru/project/38-sistemy-kontrolya-zon-vozmozhnogo-progara-futerovki-stalenalivochnyh-kovshey.html> (in Russian)]

[16] Инструкция по футеровке и сушке доменных печей и их вспомогательных устройств. Гипромет, г. Москва, 1978,– 80 стр. [Instructions for lining and drying blast furnaces and their auxiliary devices. Gipromet, Moscow, 1978, 80 p. (in Russian)]

[17] Prikhodko E., Nikiforov A., Kinzhibekova A., Paramonov A., Aripova N., Karmanov A. Analysis of the Effect of Temperature on the Ultimate Strength of Refractory Materials. *Energies* 2023, No 16, 6732.

[18] Арипова Н.М., Никифоров А.С., Парамонов А.М., Приходько Е.В., Кинжибекова А.К., Карманов А.Е. Исследование зависимости термостойких свойств огнеупорных материалов футеровок разливочных ковшей ферросплавного производства от температуры // *Стекло и керамика*, 2025, Т. 98, № 10, С. 39–47 [Aripova N. M., Nikiforov A. S., Paramonov A. M., Prikhodko E. V., Kinzhibekova A. K., Karmanov A. E. Investigation of the dependence of the thermal strength properties of refractory materials of lining ladles of ferroalloy production on temperature // *Glass and Ceramics*, 2025, Vol. 98, No. 10, Pp. 39–47 (in Russian)]

Theoretical and Applied Heat Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: NSLCYD

УДК 669.1.017:620.18:620.19

**Relationship Between Thermophysical Properties
of Carbon Pipe Steel
and Hydrogen-Induced Structural Transformations**

Anna V. Nechaeva^{a*},
Vadimir V. Shalagaev^a and Aleksander S. Zavorin^b
*^aRussian Laboratory Ltd.
Saint Petersburg, Russian Federation*
*^bNational Research Tomsk Polytechnic University,
Tomsk, Russian Federation*

Received 01.12.2025, received in revised form 11.01.2026, accepted 28.01.2026

Abstract. The article presents the results of experimental studies of the temperature distribution and thermal stresses arising during the heating of carbon steel specimens, in their relationship with microstructural hydrogen-induced transformations. Samples of radiant heating surface tubes experiencing the maximum temperature gradient during boiler operation are examined (the front (fire) side of the tube faces the radiating medium of the furnace, and the rear side faces the refractory lining). Under the influence of hydrogen, the ferrite-pearlite microstructure on the front side transforms into a predominantly ferrite structure, while the microstructure on the rear side remains unchanged. This microstructural gradient across the cross-section of steam-generating tubes results in a 35 % difference in thermal stresses between the hydrogenated and undamaged walls (front/rear) at the initial moment of heating. Subsequently, as the tube wall heats up, this difference decreases to 10 %. The obtained results can explain the facts of destruction of hydrogen-embrittled pipes during boiler start-up, and not in steady-state operating mode.

Keywords: thermophysical properties, hydrogen, carbon steel, structural-phase state, heating surface tubes.

Citation: Nechaeva A. V., Shalagaev V. V., Zavorin A. S. Relationship Between Thermophysical Properties of Carbon Pipe Steel and Hydrogen-Induced Structural Transformations. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(2), 154–163. EDN: NSLCYD



© Siberian Federal University. All rights reserved

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

* Corresponding author E-mail address: pomazova@yandex.ru

Связь теплофизических свойств трубной углеродистой стали с водород-индуцированными трансформациями структуры

А. В. Нечаева^а, В. В. Шалагаев^а, А. С. Заворин^б

*^аАО НДЦ НПФ «Русская лаборатория»,
Российская Федерация, Санкт-Петербург*

*^бНациональный исследовательский
Томский политехнический университет
Российская Федерация, Томск*

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований распределения температур и термических напряжений, возникающих при прогреве образцов из углеродистой стали, в их взаимосвязи с микроструктурными водород-индуцированными трансформациями. Рассмотрены образцы труб радиационных поверхностей нагрева, испытывающих при работе котла максимальный температурный градиент (фронтальная (огневая) сторона трубы обращена в сторону излучающей среды топки, а тыловая – к обмуровке). При этом с фронтальной стороны под действием водорода происходит трансформация феррито-перлитной микроструктуры преимущественно ферритную структуру, с тыловой стороны микроструктура не изменяется. Этот микроструктурный градиент по сечению пар генерирующих труб приводит к разнице в 35 % в температурных напряжениях между наводороженной и неповрежденной стенкой (фронтальная/тыловая) в начальный момент прогрева. Далее, по мере прогрева стенки труб, эта разница снижается до 10 %. Полученные результаты могут объяснять факты разрушения водородохрупченных труб во время пуска котла, а не в стационарном режиме эксплуатации.

Ключевые слова: теплофизические свойства, водород, углеродистая сталь, структурно-фазовое состояние, трубы поверхностей нагрева.

Цитирование: Нечаева А. В. Связь теплофизических свойств трубной углеродистой стали с водород-индуцированными трансформациями структуры / А. В. Нечаева, В. В. Шалагаев, А. С. Заворин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(2). С. 154–163. EDN: NSLCYD

Введение

Пуски и остановки энергетических котлов – это сложные процессы, сопровождающиеся нестационарными режимами работы. В эти периоды параметры системы постоянно изменяются, создавая высокие термомеханические напряжения в различных узлах оборудования. Это особенно критично для элементов, подверженных значительным перепадам температуры. Оптимизация режимов пуска котлов требует тщательного расчета этих напряжений, особенно в наиболее уязвимых сечениях оборудования, где максимальный температурный градиент достигает своего пика [1]. Даже при строгом соблюдении всех предписанных процедур прогрева значительная часть аварий происходит именно на этапе запуска котла. К примеру, сечение по периметру труб экранных поверхностей нагрева в процессе прогрева подвергается воздействию неравномерного теплового поля. Фронтальная сторона трубы, обращенная к топочному пространству, испытывает интенсивное тепловое воздействие, в то время как тыловая сторона, прилегающая к обмуровке, нагревается значительно медленнее за счет растечки тепла. Это создает существенный температурный гра-

диент по периметру (сечению) трубы, приводящий к возникновению значительных внутренних термомеханических напряжений [2]. Высокая теплопроводность металла при этом способствует активному теплоотводу от внутренней поверхности стенки трубы к пароводяной смеси и быстрому прогреву сечения трубы, что предотвращает термомеханическую усталость. Влияние теплопроводности на долговечность трубных элементов подробно изучалось в ряде исследований, в том числе с применением нейронной сети [3]. Например, в работе [4] авторы продемонстрировали изменение температурных напряжений в связи со структурными превращениями в феррито-мартенситной стали под действием усталостных нагрузок. Эти изменения, обусловленные микроструктурными перестройками, напрямую влияют на прочность и долговечность материала. Известна также модель прогнозирования теплопроводности [5] в связи с изменениями микроструктуры стали. Авторам [6] удалось установить прямую зависимость эффективной теплопроводности стенок котельных труб от их микроструктурных составляющих, даже в рамках одного структурного класса сталей (феррито-перлитная сталь). Все эти исследования свидетельствуют о том, что различия в микроструктуре приводят к разбросу значений коэффициентов теплопроводности, что, в свою очередь, не может не влиять на скорость развития хрупких повреждений.

Одной из наиболее опасных причин хрупких повреждений труб поверхностей нагрева является водородная хрупкость [7]. Этот процесс, сопровождающийся значительными неравномерными микроструктурными изменениями в металле, часто приводит к разрушению именно в период пускового прогрева котла, что актуализирует наличие тщательного контроля температурных режимов на всех этапах запуска. В большинстве работ показано, что водородные повреждения сопровождаются внутренним растрескиванием вследствие образования метановых полостей [8, 9]. В этом случае следует ожидать значительное падение теплопроводности стенки трубы за счет повышения ее термического сопротивления из-за наличия в ней метановых полостей, обладающих гораздо меньшей теплопроводностью, чем металл трубы. Вместе с тем было высказано предположение [10], что в процессе длительного эксплуатационного воздействия водорода, обезуглероживание перлитных зерен может быть объяснено скоплением углерода (графита) по границам зерен металла, вследствие этого углерод не покидает металл труб в виде метана и метановые полости внутри стенки трубы не формируются. При этом в структуре значительно увеличивается количество ферритных и уменьшается количество перлитных зерен. Теплопроводность феррита – 80 Вт/м·К, перлита находится в диапазоне 17–36 Вт/м·К в зависимости от формы цементита [11], таким образом, металл трубы обогащается более теплопроводными зернами, что в рассматриваемом механизме должно привести к обратному эффекту – к увеличению эффективной теплопроводности стенки трубы.

Детальное изучение микроструктурных изменений и их связи с теплопроводностью и возникновением напряжений позволит объяснить наблюдаемые процессы водород-индуцированных разрушений на этапе прогрева котлов, а в дальнейшем совершенствовать эффективные и безопасные методы эксплуатации энергетических агрегатов, имеющих в своем составе охрупченное водородом оборудование. В связи с этим экспериментальное определение возникающих термических напряжений с фронтальной и тыловой сторон таких труб представляется весьма актуальной задачей для повышения надежности работы энергетических котлов. Особенно важны данные исследования для котельного оборудования, эксплуатирующегося значительно дольше установленного паркового ресурса, но планируемого к переводу на сжигание непроектных видов топлив [12].

Материалы и методики исследования

В качестве объектов испытаний выбраны трубы из стали 20 поверхностей нагрева энергетических котлов, изготовленные по ТУ 14–3Р-55–2001, типоразмером 76×6 мм.

Химический анализ состава образцов проводился согласно ГОСТ Р 54153–2010. Определение массовой доли водорода проводилось в соответствии с ГОСТ 17745–90 методом вакуум-нагрева. Для выявления структурных составляющих образцов использовался 4 %-й спиртовой раствор HNO_3 . Для металлографического анализа применялись оптический и электронный микроскопы. При исследовании температурных полей применялся метод непосредственного измерения температур с нагреваемой и противоположной сторон трубного образца с помощью поверенного пирометра, имеющего максимальную погрешность $\pm 2^\circ\text{C}$. Как показано в [13], это обеспечение позволяет решать обратную задачу теплопроводности, в которой граничные условия определяются на основе экспериментальных исследований температуры в выбранных точках образца, что позволяет рассчитать теплофизические свойства.

Эксперименты осуществлялись по двум схемам (рис. 1).

Исследовались образцы, вырезанные из парогенерирующих труб после более 100 тыс. ч эксплуатации в водородсодержащей среде. Из труб были изготовлены образцы в виде фрагментов труб длиной 60 мм для испытания по первой схеме (рис. 1а), таким образцам присвоена маркировка – «Экс-вод». Дополнительно для данной схемы испытаний изготавливались образцы из аналогичных труб, бывших в длительной эксплуатации, но не имеющих следов водородного воздействия, таким образцам присваивалась маркировка – «Экс-невод». Далее поверхности этих образцов полировались и располагались на плотно прилегающей подложке. Подложки изготавливались из хорошо проводящего материала (алюминий), имели идентичный размер и вес. Поверхности подложек и отрезков труб были притерты друг к другу для устранения воздушных «карманов». При этом было учтено фактическое расположение труб при эксплуатации: фронтальные стороны труб были обращены к алюминиевой подложке, измерение температуры проводилось с тыловой стороны труб.

Для испытаний по второй схеме (рис. 1б) из образцов «Экс-вод» вырезались фрагменты с плоскопараллельными зашлифованными поверхностями равного размера. Маркировка

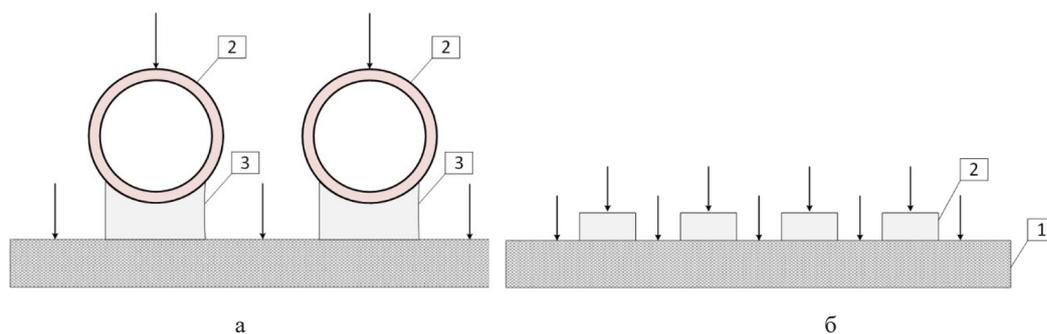


Рис. 1. Схемы испытаний: а – схема испытаний № 1; б – схема испытаний № 2; 1 – нагревательная поверхность, 2 – испытуемый образец; 3 – подложка; стрелкой указаны места контроля температур

Fig. 1. Test schemes: a – test scheme No. 1; b – test scheme No. 2; 1 – heating surface, 2 – test sample; 3 – substrate; the arrow indicates the temperature control locations

«фронт» присвоена образцам, вырезанным из стенок этих труб с фронтальной стороны, «тыл» – из стенок труб с тыловой стороны.

Несмотря на то что предварительно была проверена равномерность поля нагрева по площади платформы (± 1 °C), была проведена серия испытаний с переменной подложкой и изменением мест расположения образцов на нагревающей платформе, далее рассчитывались средние значения. При анализе результатов учитывались не абсолютные значения температур, а относительные характеристики (разность температур образцов в одной серии испытаний), что позволяло снизить общую погрешность испытаний.

Приоритет в выборе методов регистраций и измерений, а также методик испытаний определялся реальными возможностями узкоотраслевых экспертных лабораторий, которые выполняют практические исследования технических устройств при проведении регламентного технического диагностирования и разрабатывают мероприятия по пуско-наладке котельного оборудования. Это позволит при необходимости внедрить примененный в статье подход в комплекс работ по установлению фактического состояния материала промышленного оборудования и скорректировать рекомендации по пуско-наладке при эксплуатации котельного оборудования.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

По результатам металлографического анализа и прямого измерения концентрации водорода установлено, что исследуемые эксплуатационные парогенерирующие трубы котлов, выбранные для испытания по схемам № 1 и № 2 (образцы «фронт», «тыл», «Экс-вод»), подверглись неравномерному водородному влиянию. Экспериментальные исследования показали, что микроструктура металла образцов с маркировкой «фронт» значительно обезуглерожена по сравнению с образцами с маркировкой «тыл» (рис. 2). Количество водорода в образцах «тыл» составляет 1,5 ppm, количество перлита – 28 %. Количество водорода в образцах «фронт» составляет 6,5 ppm, что привело к снижению доли перлита до 11 %. Указанные признаки являются индикаторами водородного воздействия на металл труб [8, 9]. При этом не зафиксировано градиента в концентрациях ни водорода, ни углерода по толщине стенки трубы (ни с фронтальной, ни с тыловой стороны). Микроструктурное строение образцов «Экс-невод» аналогично образцам «тыл».

Металлическая матрица образцов «тыл» включает феррит, перлит, цементит. Частичное обезуглероживание микроструктуры с фронтальной стороны труб, как показано в [10], происходит за счет трансформации цементита в графит. В этом случае можно рассматривать такую структуру как композиционный материал, состоящий из металлической матрицы и графита [14].

При определении различия в температуропроводности образцов в виде отрезков труб («Экс-вод» и «Экс-невод») проведена серия испытаний согласно схеме № 1. Определялась разница между температурами на тыловых сторонах труб по формуле:

$$\Delta t_{\text{тр}} = t_{\text{Экс-невод}} - t_{\text{Экс-вод}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{Экс-невод}}$ и $t_{\text{Экс-вод}}$ – температуры на тыловых сторонах отрезков труб образцов «Экс-вод» и «Экс-невод» соответственно.

По полученным данным построен график разницы температур исследуемых образцов от времени нагрева (рис. 3). Максимальный градиент температур между сравниваемыми трубами фиксируется после начала нагрева в течение 13÷19 мин. В этот период времени у трубы

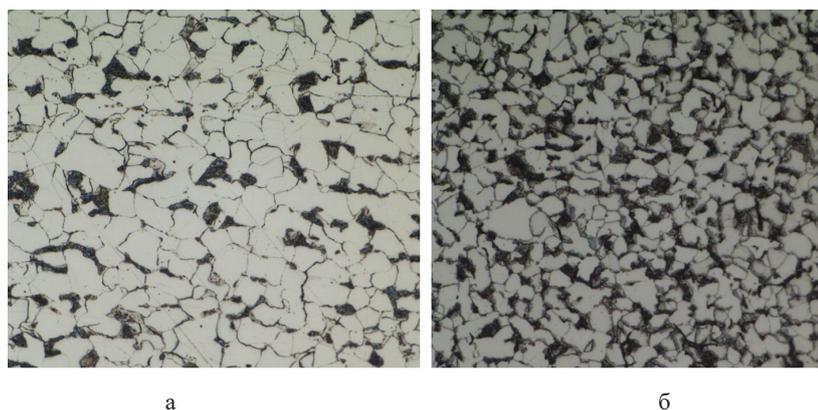


Рис. 2. Микроструктура образцов при 500-крат.увел.: а – «фронт», б – «тыл»

Fig. 2. Microstructure of samples at 500x magnification: a – “front”, b – “rear”

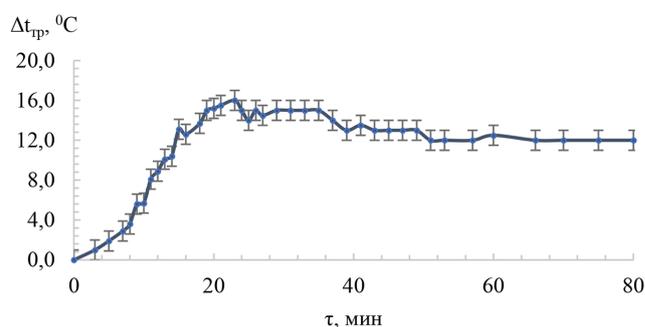


Рис. 3. Изменение разницы температур между тыловыми сторонами труб образцов «Экс-вод» и «Экс-невод» от времени нагрева

Fig. 3. Change in the temperature difference between the rear holes of the pipes of the “Ex-vod” and “Ex-nevod” samples depending on the heating time

«Экс-невод» изменяется температура по сечению труб эффективнее на 15÷16 %, по сравнению с трубами с маркировкой «Экс-вод» ($t_{\text{экс-вод}} = 67 \div 100$ °C, $t_{\text{экс-невод}} = 78 \div 117$ °C). В конечный момент нагрева ($\tau = 80$ мин), когда температуры на тыловых сторонах уже не меняются (не увеличиваются), разница в значениях уменьшается до 6,5 % (12 °C).

Для изучения причин снижения теплопроводности, а значит, и растечки температур по сечению труб с маркировкой «Экс-вод» проведены испытания по схеме № 2 (рис. 1б). Напомним, что вырезанные из «Экс-вод» образцы «фронт» имеют микроструктурную деструкцию, вызванную водородом, а образцы «тыл» имеют микроструктуру, близкую к новым трубным изделиям. При изучении теплопроводности этих образцов определялся температурный перепад по толщине стенки (Δt) по формуле (2), распределение температур по толщине стенки определялось по формуле (3), термические напряжения определялись по формуле (4) согласно [1]:

$$\Delta t = t_{\text{н}} - t_{\text{вн}}, \quad (2)$$

$$t = t_{\text{вн}} + \Delta t \left(\frac{x}{\delta} \right)^2, \quad (3)$$

$$\sigma_t = \frac{\beta E}{1 - \mu} \left[\frac{1}{3} - \left(\frac{x}{\delta} \right)^2 \right] \Delta t, \quad (4)$$

где $t_{\text{н}}$ и $t_{\text{вн}}$ – температуры на нагреваемой наружной и внутренней поверхностях, t – текущая температура, x – текущая координата (отсчет от внутренней поверхности), δ – толщина стенки, β – коэффициент линейного расширения, E – модуль упругости, μ – коэффициент Пуассона.

По полученным значениям построены графики зависимости температурного перепада по толщине стенки (Δt) от времени нагрева (τ) (рис. 4). Анализ полученных данных показывает, что образцы с маркировкой «фронт» имеют худшую теплопроводность, по сравнению с образцами «тыл». Вероятнее всего, наблюдаемое увеличение термического сопротивления образцов с маркировкой «фронт» связано со скоплением графита по границам зерен при распаде цементитной составляющей анализируемой стали. То есть, несмотря на обогащение металлической матрицы ферритом, имеющим теплопроводность, более чем в два раза превосходящую теплопроводность перлита, зафиксировано снижение общей теплопроводности образцов. На примере чугунов показано [11, 15], что это может быть связано с тем, что теплопроводность графита сильно анизотропна, зависит от его морфологии и не превышает 5.7 Вт/м·К. При пластинчатой форме графита теплопроводность уменьшается с повышением температуры, что и наблюдалось в настоящем эксперименте (рис. 4), что косвенно указывает на формирование при водородной атаке именно такой морфологии графита, однако для убедительного подтверждения данного факта требуются более детальные исследования.

Максимальный температурный перепад по сечению стенки из схемы испытаний № 2 составляет 34 °С («фронт» – $\Delta t = 224$ °С, «тыл» – $\Delta t = 190$ °С). Допустимость такого перепада температур можно косвенно оценить по коэффициенту растечки теплоты, учитывающему неравномерность тепловых нагрузок по периметру труб поверхности нагрева. Согласно [16] коэффициент растечки такой трубы составит менее 0.82, при рекомендуемом диапазоне 0.85–1.0. Также необходимо отметить, что конструкция поверхностей нагрева, экранирующихся трубами топочное пространство, позволяет производить замену трубных элементов частями. В этом

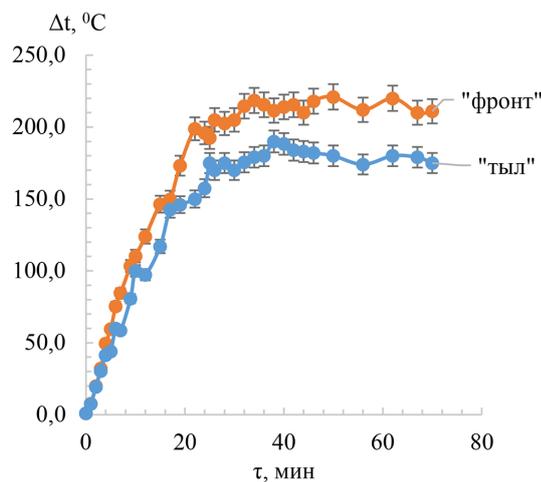


Рис. 4. Температурный перепад по толщине стенки в зависимости от времени нагрева

Fig. 4. Temperature difference across the wall thickness depending on heating time

случае складывается ситуация, когда одновременно в работе находятся трубы, ослабленные водородом в процессе длительной эксплуатации, и замененные участки новых труб. При этом неравномерность тепловосприятости поверхностей нагрева может быть вызвана как разницей в теплопроводности труб, имеющих разную степень трансформации структуры под влиянием водорода, так и снижением теплопроводности отдельных труб с пониженным коэффициентом растечки. Известно, что увеличение неравномерности тепловосприятости даже в пределах одной отметки по высоте топки вызывает снижение надежности работы парогенерирующих труб из-за увеличения тепловой и гидравлической развертки.

По приведенным формулам (2)-(4) построены эпюры распределения температур и термических напряжений в стенке образцов «фронт» (рис. 5а) и «тыл» (рис. 5б) для разных моментов времени – 5, 10, 70 мин. Анализ полученных расчетно-экспериментальных данных показал, что внутренняя поверхность испытывает при прогреве напряжения растяжения, а наружная – сжатия. При этом пиковая нагрузка, соответствующая наибольшей разнице между напряжениями на поверхностях «фронт» и «тыл», наблюдается в начальный момент прогрева при $\tau=5$ мин ($\sigma_{\text{вн(фронт)}}=67,4$ МПа, $\sigma_{\text{вн(тыл)}}=49,9$ МПа, $\sigma_{\text{тн(фронт)}}=-134,9$ МПа и $\sigma_{\text{тн(тыл)}}=-99,9$ МПа). Эта разница при $\tau=5$ мин составляет 35 %, далее по мере прогрева уменьшается до 10 %.

Пиковый разброс в уровнях термических напряжений по сечению стенки труб в начальный момент прогрева объясняет факт развития повреждений ослабленных водородом труб поверхностей нагрева в процессе запуска энергетического котла. А высокий уровень напря-

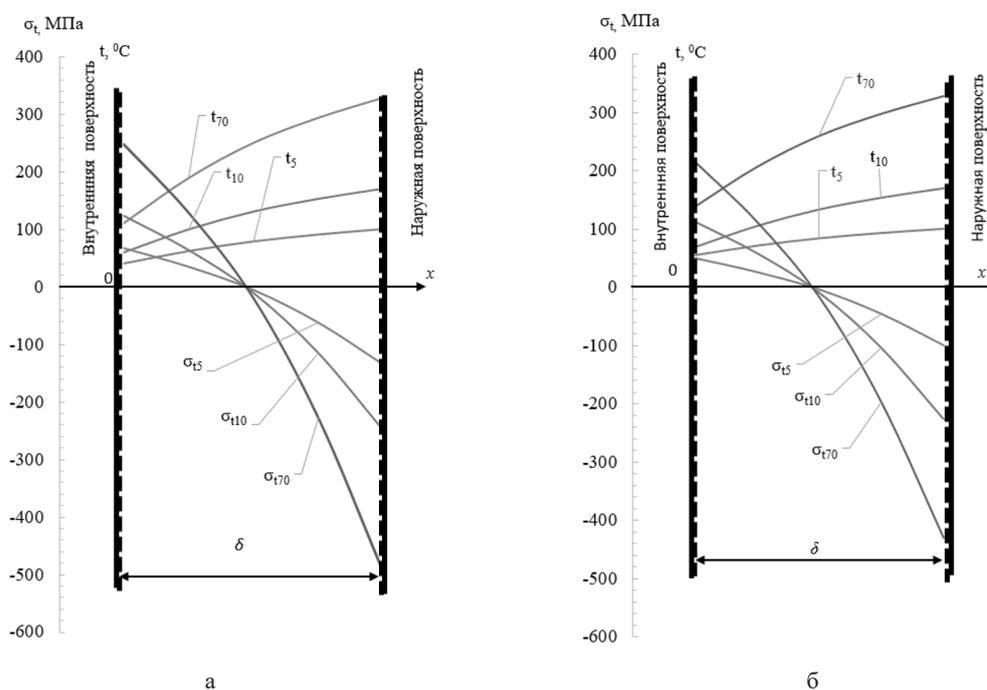


Рис. 5. Эпюры распределения температур и термических напряжений в стенке для разных моментов времени $\tau = 5, 10, 70$ мин: а – «фронт», б – «тыл»

Fig. 5. Temperature distribution diagrams and thermal stresses in the wall for different moments of time $\tau = 5, 10, 70$ min: a – “front”, b – “rear”

женности металла связан с анизотропными свойствами образованной под действием водорода композитной структуры, содержащей металлическую матрицу и графит.

Выводы

Расчетно-экспериментальным методом установлено снижение теплопроводности стали после трансформации (деструкции) микроструктуры под действием водорода. Несмотря на обогащение матрицы стали более проводящим компонентом (ферритом), теплопроводность металла труб уменьшается, предположительно, за счет скопления по границам зерен графита, обладающего значительной анизотропией и пониженной проводимостью.

Наблюдаемое на практике снижение эффективности работы энергетического котла может быть связано с увеличением неравномерности тепловосприятия поверхностей нагрева, содержащих в своем составе элементы с отличающимся структурным состоянием вследствие неравномерности водородного воздействия и практикуемой частичной замены таких элементов (парогенерирующих труб). Трубы, не имеющие микроструктурных трансформаций, обусловленных влиянием водорода, передают тепло по сечению труб эффективнее на 15–16 % по сравнению с трубами, имеющими такие изменения.

Пиковая нагрузка, при которой получен наибольший градиент термических напряжений в сечении односторонне нагреваемой трубы (35 %), соответствует моменту начального прогрева труб, далее по мере прогрева эта разница уменьшается до 10 %. Это обстоятельство объясняет факт развития повреждений ослабленных водородом труб поверхностей нагрева в процессе запуска энергетического котла.

Список литературы / References

[1] Галашов Н.Н. *Режимы работы и эксплуатация ТЭС: учебное пособие*, Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 252 с. [Galashov N.N. *Operating modes and operation of thermal power plants: a tutorial*, Tomsk, Publishing house of Tomsk Polytechnic University, 2013. 252 p. (in Russian)]

[2] Рудыка А.В., Шейкин С.И., Шлыгин В.В. Температурный режим труб топочных экранов котла П-67. *Теплоэнергетика*, 1991, 3, 32–36 [Rudyka A.V., Shejkin S.I., Shlygin V.V. The Temperature Conditions of the Pipes of Furnace Flues of the Boiler P-67, *Thermal Engineering*, 1991, 3, 32–36 (in Russian)]

[3] Ahmadi M.H., Sadeghzadeh M., Raffiee A.H., Chau K.W. Applying GMDH neural network to estimate the thermal resistance and thermal conductivity of pulsating heat pipes. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, (2019), 13(1), 327–336. <https://doi.org/10.1080/19942060.2019.1582109>

[4] Torabian N., Favier V., Ziaei-Rad S., Dirrenberger J., Adamski F., Ranc N. Thermal response of DP600 dual-phase steel under ultrasonic fatigue loading, *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 677, 97–105. DOI: 10.1016/j.msea.2016.09.025

[5] Peet M.J., Hasan H.S., Bhadeshia H.K.D.H. Prediction of thermal conductivity of steel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, 54 (11–12), 2602–2608. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.01.025>

[6] Помазова А.В., Заворин А.С., Артамонцев А.И. Панова Т.В. Взаимосвязь теплопроводности дефектных структур котельных труб со стойкостью к коррозионно-термической уста-

лости, *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2017, 10 (4), 557–571. [Pomazova A. V., Zavorin A. S., Artamonov A. I., Panova T. V. Relationship between thermal conductivity of defects in boiler tube structures and resistance to corrosion-thermal fatigue, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol*, 2017, 10 (4), 557–571 (in Russian)]

[7] Нечаева А. В., Полянский В. А., Полянский А. М., Шалагаев В. В., Яковлев Ю. А. Анализ причин хрупкого разрушения труб поверхностей нагрева котлов после длительной эксплуатации. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2024, 90(4), 53–65 [Nechaeva A. V., Polyansky V. A., Polyansky A. M., Shalagaev V. V., Yakovlev Yu. A. Analysis of the causes of brittle destruction of pipes of boiler heating surfaces after prolonged operation. *Factory laboratory. Diagnostics of materials*, 2024, 90 (4), 53–65 (in Russian)]. DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-4-53-65>

[8] Арчаков Ю. И. *Водородная коррозия стали*. М.: Металлургия, 1985, 192 с. [Archakov Yu. I. *Hydrogen corrosion steel*, Moscow, Metallurgy, 1985, 192 p. (in Russian)]

[9] Колачев Б. А. Водородная хрупкость металлов. *Итоги науки и техники. Серия «Металловедение и термическая обработка»*. М.: Наука, 1989. 221 с. [Kolachev B. A. Hydrogen embrittlement of metals. *Results of science and technology. Series “Metal science and heat treatment”*, Moscow, Nauka, 1989. 221 p. (in Russian)]

[10] Nechaeva A. V., Vagina L. G., Polyansky A. M., Polyansky V. A. Shalagaev V. V., Yakovlev Yu. A. Redistribution of carbon in steels during long-term operation of equipment in hydrogen-containing environments, *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2025, 1, 011–022. DOI: [10.17804/2410-9908.2025.1.011-022](https://doi.org/10.17804/2410-9908.2025.1.011-022).

[11] Wang Gh., Li Yx. Thermal conductivity of cast iron -A review. *China Foundry*, 2020, 17, 85–95. <https://doi.org/10.1007/s41230-020-9112-8>

[12] Куандыкова А. А., Лебедев В. М. О перспективе перевода омских ТЭЦ на сжигание отечественных углей. *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2021, 14(1), 118–129 [Kuandykova A. A., Lebedev V. M. On the prospects of transferring Omsk thermal power plants to burning domestic coal, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol*, 2021, 14(1), 118–129(in Russian)]. DOI [10.17516/1999-494X-0292](https://doi.org/10.17516/1999-494X-0292)

[13] Kharab A., Howari F. M. Calculating thermal coefficients using a hybrid method. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2021, 34(1), 127–136. <https://doi.org/10.12732/IJAM.V34I1.6>

[14] Helsing J., Helte A. Effective conductivity of aggregates of anisotropic grains. *Journal of Applied Physics*, 1991, 69(6), 3583–3588. <https://doi.org/10.1063/1.348501>

[15] Wang Gh., Li Yx. Calculating the effective thermal conductivity of gray cast iron by using an interconnected graphite model. *China Foundry*, 2020, 17, 183–189. <https://doi.org/10.1007/s41230-020-0029-z>

[16] Абрютин А. А., Карасина Э. С., Петросян Р. А., Фомина В. Н., Блох А. Г., Мочан С. И., Назаренко В. С., Чавчанидзе Е. К. *Тепловой расчет котлов (нормативный метод). Издание третье, переработанное и дополненное*, Санкт-Петербург: Издательство АОТ НПО ЦКТИ и АОТ ВТИ, 1998, 256 с. [Abyutin A. A., Karasina E. S., Petrosyan R. A., Fomina V. N., Blokh A. G., Mochan S. I., Nazarenko V. S., Chavchanidze E. K. *Thermal calculation of boilers (normative method). Third edition, revised and supplemented*, St. Petersburg: Publishing house of AOOT NPO TsKTI and AOOT VTI, 1998, 256 p. (in Russian)]

Theoretical and Applied Heat Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: HLAEGS

УДК 536.24:532.517.4:519.87

**Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer
in a Ranque-Hilsch Vortex Tube**

Marat M. Gafurov*,
Tatiana A. Kulagina and Tatiana A. P'yanykh
Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation

Received 21.12.2025, received in revised form 26.01.2026, accepted 28.01.2026

Abstract. The pressing issue of environmental pollution in various industrial sectors currently requires the improvement of existing technological processes, production facilities, and equipment, as well as the implementation of new high-tech technologies. The results of our research suggest that reducing environmental emissions and increasing production efficiency are possible using the vortex effect, discovered by engineer J. Ranque in 1920. It is demonstrated that the Ranque-Hilsch vortex tube is a promising device for implementation in various industries.

Keywords: vortex tube, temperature separation, numerical simulation.

Citation: Gafurov M. M., Kulagina T. A., P'yanykh T. A. Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer in a Ranque-Hilsch Vortex Tube. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(2), 164–171. EDN: HLAEGS



**Численное моделирование процесса тепломассообмена
в вихревой трубке Ранка-Хилша**

М. М. Гафуров, Т. А. Кулагина, Т. А. Пьяных
Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. В настоящее время остро стоящий вопрос о загрязнении окружающей среды в различных областях промышленности требует усовершенствования ныне действующих технологических процессов, производств и оборудования, а также внедрения новых наукоемких

© Siberian Federal University. All rights reserved

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

* Corresponding author E-mail address: gmara2021@mail.ru

технологий. Результаты проведенных нами исследований позволяют утверждать, что снижение выбросов в окружающую среду и увеличение эффективности производства возможно на базе вихревого эффекта, открытого инженером Ж. Ранком в 1920 году. Показано, что вихревая трубка Ранка-Хилша является перспективным устройством, внедряемым в различные отрасли промышленности.

Ключевые слова: вихревая труба, температурное разделение, численное моделирование.

Цитирование: Гафуров М. М. Численное моделирование процесса тепломассообмена в вихревой трубке Ранка-Хилша / М. М. Гафуров, Т. А. Кулагина, Т. А. Пьяных // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(2). С. 164–171. EDN: HLAEGS

Введение

Вихревой эффект нашел широкое применение в различных отраслях промышленности: химической, авиационной, машиностроении, медицине, сельском хозяйстве и др. [1]. Вихревые трубки (ВТ) Ранка-Хилша применяются в различных производственных процессах для охлаждения или нагрева газов, сепарации, осушения, разделения газовых смесей и др. [2, 3]. Существуют несколько разновидностей ВТ, подробно описанных в трудах А. П. Меркулова [4]. Разные по исполнению ВТ были рассчитаны и разработаны для определенных задач. Так, например, в работе [5] представлены результаты исследований газодинамических процессов в вихревых трубках Ранка-Хилша. Экспериментальным путем определены численные значения, которые позволяют найти оптимальные их характеристики. Найдено несколько фундаментальных эффектов. Предложены новые дифференциальные уравнения для расчетов характерных параметров в этих трубках. Показано направление, в котором стоит продолжить расчетно-экспериментальные исследования в части поиска оптимальных конструктивных решений при проектировании устройств, использующих эффект Ранка-Хилша. Однако до сих пор нет однозначного описания механизма стратификации потоков в этих трубках на горячий и холодный. Несмотря на множество положительных достоинств: относительно низкая стоимость, отсутствие движущихся частей, малые габаритные размеры, возможность использования горячего и холодного потока и т.д., имеются недостатки, такие как ощутимый шум и низкий КПД. Для повышения эффективности работы трубок велись исследования по изучению влияния давления на входе и геометрических характеристик устройства. Доказано, что на производительность ВТ оказывают значительное воздействие отношение длины и диаметра трубки, расход воздуха, отношение диаметра входного и выходного сопла, количество форсунок и т.д. [6–19].

Методы и принципы исследования

Для объяснения процесса энергоразделения в ВТ выделено несколько гипотез, подробно рассмотренных в [17]. Проводимые исследования с целью обосновать процесс энергоразделения и выявить влияние геометрических параметров на производительность ВТ получили новые возможности с применением соответствующих программ.

В данной работе проводились исследования с помощью программы ANSYS FLUENT противоточной вихревой трубы с входным давлением 3 бар, 4 бар, 4,5 бар 5 бар, при следующих допущениях: течение газа является стационарным, турбулентным, закрученным в 2D-осесимметричной

вихревой постановке в модели RNG k-ε (+SDF), среда представляет собой идеальный вязкий сжимаемый газ.

Математическая постановка задачи

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho v r}{\partial r} = 0. \quad (1)$$

Уравнение изменения импульса в продольном направлении, описанное С.Г. Черным и др. [20]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u^2}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho u v r}{\partial r} = & -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial v r}{\partial r} \right) \right) \right] + \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[(\mu + \mu_t) r \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнение изменения импульса в радиальном направлении [20] в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u v}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho v^2 r}{\partial r} = & -\frac{\partial \rho}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] + \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[(\mu + \mu_t) r \left(2 \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial v r}{\partial r} \right) \right) \right] - 2 \left(\frac{(\mu + \mu_t) v}{r^2} \right) + \frac{\rho v w^2}{r}. \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнение изменение импульса в окружном направлении [20]:

$$\frac{\partial \rho u w}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho v w r}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial w}{\partial x} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[(\mu + \mu_t) r^3 \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{w}{r} \right) \right] - \frac{\rho v w}{r}. \quad (4)$$

Уравнение изменения энергии, приведенное в [21] к виду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho h u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho h v r}{\partial r} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[(\lambda + \lambda_t) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[(\lambda + \lambda_t) r \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \\ & + (\mu + \mu_t) \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right] + \right. \\ & \left. + \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{w}{r} \right) \right]^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 - \frac{2}{3} \left[r \frac{\partial}{\partial r} (r v) + \frac{\partial u}{\partial x} \right]^2 \right\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Уравнение изменения кинетической энергии турбулентных пульсаций, приведенное Кузьминовым А. В. в [22]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u k}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho v k r}{\partial r} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) r \frac{\partial k}{\partial r} \right] + \\ & + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m. \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнение изменения скорости диссипации турбулентной энергии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u \varepsilon}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho v \varepsilon r}{\partial r} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) r \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right] + \\ & + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} C_b, \end{aligned} \quad (7)$$

где $h = C_p T + \frac{u^2 + v^2}{2}$; $C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$, $\eta = S \frac{\kappa}{\varepsilon}$, $S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$;

$$S = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{\partial v}{\partial r} & \frac{1}{2} r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{w}{r} \right) \\ \frac{1}{2} \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{1}{2} r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{w}{r} \right) & \frac{v}{r} \end{pmatrix};$$

$$G_k = \mu_t \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v}{r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(r \frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 \right\};$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon}; \lambda_t = \lambda + \frac{C_p \mu_t}{Pr_t}; Y_m = 2\rho \varepsilon M_t^2; M_t = \sqrt{\frac{k}{\alpha^2}}.$$

Математическая поставка двумерной модели рассматривается при следующих граничных условиях:

- на оси симметрии ставятся условие симметрии $\frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0, v = 0$, где $\varphi = (\rho, p, u, w, \varepsilon, k)$,
- на стенках вихревой трубы задается условие прилипания $\vec{V} = 0$,
- на выходе из вихревой трубы задается статическое давление, равное атмосферному, $P = P_{atm} = 101325$ Па и дополнительно условие радиального распределения давления $\frac{\partial P}{\partial r} = \frac{\rho w^2}{r}$.

– на входе в вихревую трубу задается полное давление $P = P_{in}$ и задается направление потока через направляющие косинусы. Также задаются интенсивность турбулентных пульсаций и гидравлический диаметр.

Решение системы уравнений осуществлялось при помощи метода конечных объемов. Для аппроксимации конвективных потоков использовалась неявная схема первого порядка точности с применением метода Roe FDS для нахождения основных газодинамических потоков на гранях ячеек.

Анализ результатов исследования

На рис. 1а, б, в, г отобраны поля скорости при подаче в трубку сжатого газа с тангенциальным углом закрутки и различным давлением. Закрученный пристеночный поток движется в противоположную сторону до клапана на горячем конце трубки, где часть газа выходит через сопло, другая часть в точке застоя вблизи клапана образует приосевой поток, движущийся в обратную сторону. Видно, что скорость приосевого потока ниже периферийного. Ближе к холодному концу трубки в области сопла происходит явное изменение поля при различных показаниях давления на входе. Можно отметить, что при повышении давления с 4 бар до 4,5 бар и 5 бар происходит не только изменение поля, но и частичное изменение скорости, ярко выраженное на рис. 1б.

Вследствие наличия генератора с шестью форсунками течение более симметричное по оси, однако при изменении давления на входе в трубку происходит изменение полей в областях горячего и холодного концов трубок, в продольном сечении трубки видна зависимость температуры от давления на входе (рис. 2).

$$P = P_{in}$$

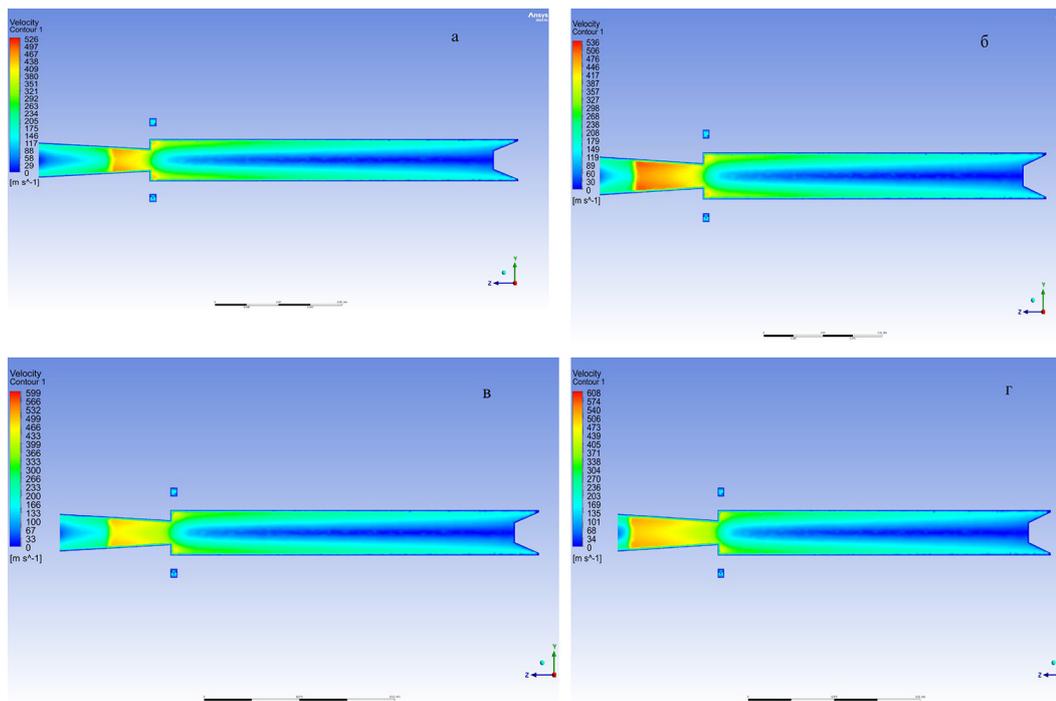


Рис. 1. Поле скоростей: а – при давлении 3 бар, б – 4 бар, в – 4,5 бар, г – 5 бар

Fig. 1. Velocity field: a – under pressure 3 bar, b – 4 bar, c – 4.5 bar, d – 5 bar

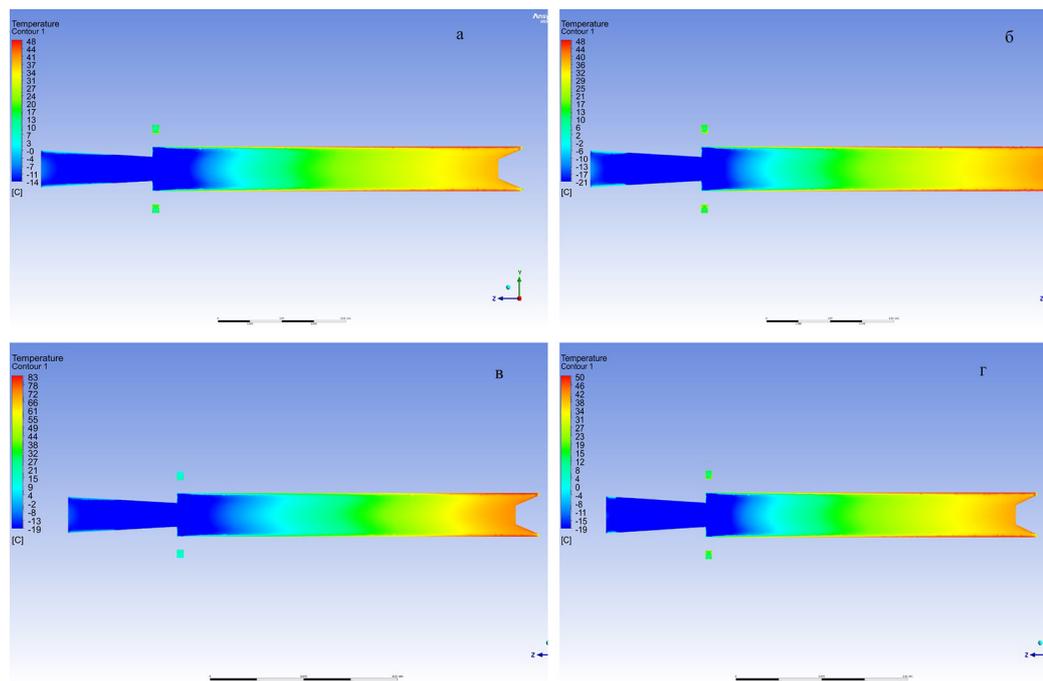


Рис. 2. Поле полной температуры: а – 3 бар, б – 4 бар, в – 4,5 бар, г – 5 бар

Fig. 2. Full temperature field: a – 3 bar, b – 4 bar, c – 4.5 bar, d – 5 bar

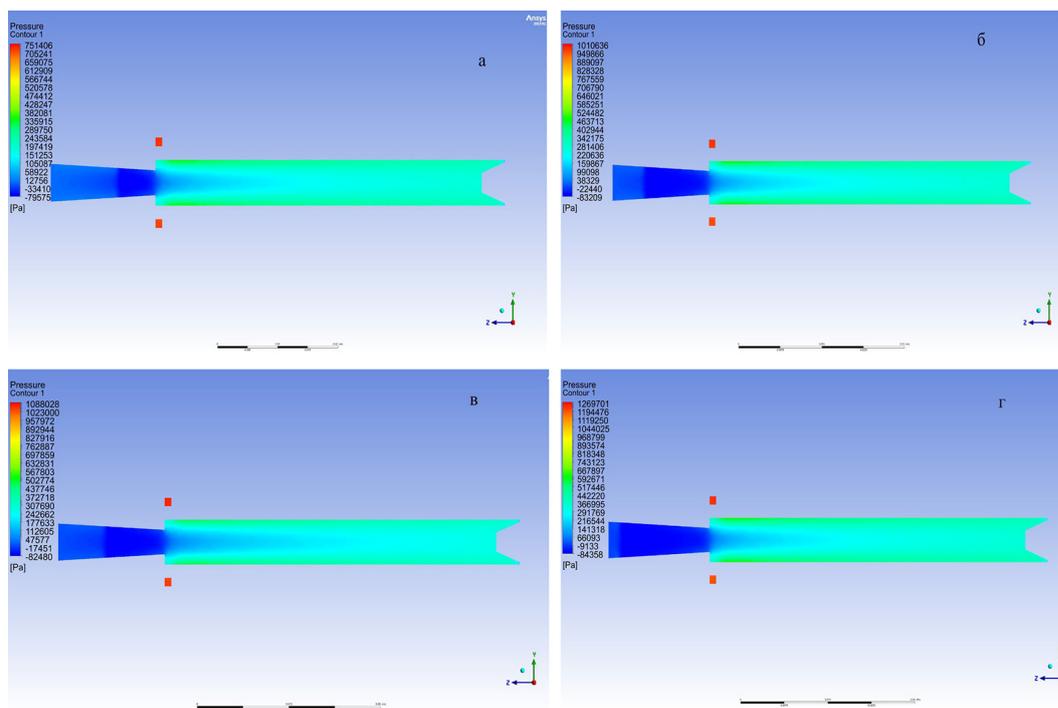


Рис. 3. Поле абсолютного давления: а – 3 бар, б – 4 бар, в – 4,5 бар, г – 5 бар

Fig. 3. Absolute pressure field: a – 3 bar, b – 4 bar, c – 4.5 bar, d – 5 bar

Изменение полей абсолютного давления на рис. 3 отчетливо выделяется изменением на холодном конце трубки при всех показателях давления на входе. При показателях 4,5 бар на входе в трубку в продольном сечении трубки вблизи оси, при дальнейшем увеличении показателей давления на входе поле изменяется, как и при показаниях давления 3, 4 бара.

Выводы

Произведено численное моделирование двумерного течения в двухпоточной ВТРХ при помощи пакета программ ANSYS FLUENT. Получены результаты, подтверждающие эффект температурного разделения. Пакет программ позволяет рассчитать некоторые параметры: температура потоков воздуха на выходе, распределение полей температуры, скорости потока и абсолютного давления. Показана зависимость температуры на выходе от давления на входе в трубку. Отмечается неустойчивое течение потоков.

Список литературы / References

- [1] Енютин Т. А., Кулагина Л. В., Гафуров М. М. Использование эффекта Ранка-Хилша в практике ликвидации чрезвычайных ситуаций. *Справочник. Инженерный журнал с приложением*. 2023. № 11. 50–54 [Enutina T. A., Kulagina L. V., Gafurov M. M. Using the Rank-Hilsh Effect in Emergency Response Practice. Handbook. *Engineering Journal with Supplement*. 2023. No. 11. 50–54 (in Russian)]. DOI: 10.14489/hb.2023.11. pp.050–054.

- [2] Антипина Н. А., Тарунин Е. Л. Расчет турбулентного режима гидродинамики и теплообмена в вихревой трубе Ранка-Хилша. *Вестник Пермского университета*. 2008. Вып. № 4(20). 70–76 [Antipina N. A., Tarunin E. L. Calculation of the Turbulent Mode of Hydrodynamics and Heat Transfer in the Rankine-Hilsch Vortex Tube. *Bulletin of Perm University*. 2008. Issue No. 4(20). 70–76 (in Russian)]
- [3] Коркодинов Я. А., Хурматуллин О. Г. Применение эффекта Ранка-Хилша. *Вестник Пермского университета*. 2012. 42–53 [Korkodinov Ya. A., Khurmatullin O. G. Application of the Rank-Hilsh Effect. *Perm National Research Polytechnic University*. 2012. 42–53 (in Russian)]
- [4] Меркулов А. П., Кекконен Л. С. Исследование вихревых труб с криволинейной осью симметрии. *Вихревой эффект и его промышленное применение: материалы III Всесоюз. науч.-техн. конф.* Куйбышев: КуАИ, 1981. 73–80. [Merkulov A. P., Kekkonen L. S. Investigation of vortex tubes with a curved axis of symmetry. *Vortex effect and its industrial application: Materials of the III All-Union. scientific and technical conf.* Kuibyshev: KuAI, 1981. 73–80 (in Russian)]
- [5] Кочетков Ю. М., Боровик И. Н., Подымова О. А. и др. Вихревые эффекты в вихревых трубах Ранка–Хилша. *Вестник МАИ*. 2016. Т. 23. № 4. 26–35 [Kochetkov Yu. M., Borovik I. N., Podymova O. A., et al. Vortex Effects in Rankine–Hills Vortex Tubes. *Vestnik MAI*. 2016. Vol. 23. No. 4. 26–35 (in Russian)]
- [6] Xue Yunpeng, Arjomandi Maziar & Kelso Richard. (2013). The working principle of a vortex tube. *International Journal of Refrigeration*. 36. 1730–1740. Doi. 10.1016/j.ijrefrig.2013.04.016.
- [7] Yunpeng Xue, Maziar Arjomandi, Richard Kelso, A critical review of temperature separation in a vortex tube, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 34, Iss. 8, 2010, 1367–1374, doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.06.010.
- [8] Liew R., Zeegers J.C. H., Kuerten J.G. M. & Michalek W.R. (2012). Maxwell’s demon in the Ranque-Hilsch vortex tube. *Physical Review Letters*, 109(5), 054503–1/4. 054503. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.054503>.
- [9] Yunpeng Xue, Maziar Arjomandi, Richard Kelso, Experimental study of the flow structure in a counter flow Ranque–Hilsch vortex tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, Iss. 21–22, 2012, 5853–5860, doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.05.081.
- [10] Yunpeng Xue, Maziar Arjomandi, Richard Kelso, Visualization of the flow structure in a vortex tube. *Experimental Thermal and Fluid Science*. Vol. 35, Iss. 8, 2011, 1514–1521, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2011.07.001>.
- [11] Patel R. B. and Bartaria V. N. (2013) Experimental Investigation & Numerical Analysis of Ranque Hilsch. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2, 1–6.
- [12] Kiran Kumar Rao K., Ramesh A., Rajesh M., Naga Malleswara Rao G. Experimental analysis of vortex tube by varying the geometry and material. A review. *Journal of Mechanical Engineering and Biomechanics*. 2016. 1–13.
- [13] Kieran Devaide and Ashok Pais / *American Journal of Heat and Mass Transfer* (2017). Vol. 4, No. 3, 115–145.
- [14] Santos E. D. D., Marques C. H., Stanescu G., Isoldi L. A., Rocha L. A. O. Constructal Design of Vortex Tubes. *Constructal Law and the Unifying Principle of Design* / Ed. by L. A. O. Rocha, S. Lorente, A. Bejan. New York: Springer New York, 2013. 259–273.

[15] Пиралишвили Ш. А., Веретенников С. В., Тряпина В. А. Визуализация структуры течения в противоточной вихревой трубке. *Тепловые процессы в технике*. 2023. Т. 15. № 10. 439–447 [Piralishvili Sh. A., Veretennikov S. V., and Tryapina V. A. Visualization of the Flow Structure in a Counterflow Vortex Tube. *Thermal Processes in Engineering*. 2023. Vol. 15. No. 10. 439–447 (in Russian)]

[16] Гафуров М. М., Кулагина Т. А. Применение теплоизоляционного чехла с использованием эффекта Ранка-Хилша в практике тушения пожаров. *Журнал СФУ. Техника и технологии*. 2025. 18(8). 1026–1035 [Gafurov M. M. Application of a thermal insulation cover using the Rank-Hilsh effect in fire extinguishing practice. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2025. 18(8). 1026–1035 (in Russian)]

[17] Гафуров М. М., Кулагина Т. А. Численное моделирование рабочего процесса в вихревой трубке. *Енисейская теплофизика: Материалы Всероссийского форума*. Красноярск: СФУ, 2025. 405–407. [Gafurov, M.M., Kulagina T. A. Numerical Modeling of the Working Process in a Vortex Tube. *Yenisei Thermal Physics: Abstracts of the All-Russian Forum*. Krasnoyarsk: SFU, 2025. 405–407 (in Russian)]

[18] Черевко Е. А. Современные гипотезы формирования процесса энергетического разделения в вихревых трубках Ранка-Хилша. *Омский научный вестник*. 2013. 1(117). 128–131 [Cherevko E. A. Modern Hypotheses of the Formation of the Energy Separation Process in Rankine-Hilsch Vortex Tubes. *Omsk Scientific Bulletin*, 2013, 1(117), 128–31 (in Russian)]

[19] Каа F. Dept. of Mechanical Engineering, Nigde University, Nigde, 51240, Turkey *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Vol. 9, No. 2, 767–772, 2016. DOI: 10.18869/acadpub.jafm.68.225.24392.

[20] Черный С. Г., Шашкин П. А., Грязин Ю. А. Численное моделирование пространственных турбулентных течений несжимаемой жидкости на основе (к-ε)-моделей. *Вычислительные технологии*. 1999. Т. 4. № 2. 74–94. [Cherny S. G., Shashkin P. A., Gryazin Yu. A. Numerical modeling of spatial turbulent flows of an incompressible fluid based on (k-ε)-models // *Comput. technologies*. 1999. V. 4. No. 2. 74–94 (in Russian)]

[21] Нестерович Н. В., Обухов А. Г. Уравнение энергии с учетом эффектов диссипации в цилиндрической системе координат. *Известия вузов. Нефть и газ*. 2017. № 5. 109–113. [Nesterovich N. V., Obukhov A. G. Energy Equation Taking into Account Dissipation Effects in a Cylindrical Coordinate *Izvestiya Vuzov. Neft i Gaz*. 2017. No. 5. 109–113 (in Russian)]

[22] Кузьминов А. В., Лапин В. Н., Черный С. Г. Метод расчета турбулентных течений несжимаемой жидкости на основе двухслойной (к-ε)-модели. *Вычислительные технологии*. 2001. Т. 6. № 5. 73–86. EDN KZBMDD. [Kuzminov A. V., Lapin V. N. and Cherny S. G. A method for calculating turbulent flows of an incompressible fluid based on a two-layer (k-ε)-model *Computational Technologies*. 2001. Vol. 6. No. 5. 73–86 (in Russian)]

Theoretical and Applied Heat Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: CVTFQL

УДК 620.97

**The Second Law of Thermodynamics, in its Current Form,
and Low-Temperature Energy Generation in the Arctic Zone**

Stutya G. Bayakin^{a*},

Nikolay V. Tsuglenok^b and Tatiana A. P'yanykh^c

^a*Institute of Space Technologies, FRC KSC SB RAS*

Krasnoyarsk, Russian Federation

^b*ANO DPO "Scientific, Educational, and Production Center
for Solar-Terrestrial Energy and Bioenergetics SB RAS"*

Krasnoyarsk, Russian Federation

^c*Siberian Federal University*

Krasnoyarsk, Russian Federation

Received 21.12.2025, received in revised form 26.01.2026, accepted 28.01.2026

Abstract. The modern energy structure is aimed at the use of carbon-free energy sources in all areas – industry, transport, aviation, and the household sector. The long-term practice of developing carbon-free generating solutions in the areas of hydropower, wind power, solar light and solar thermal energy, and high-temperature geothermal energy demonstrates the viability of the carbon-free technological structure, reveals its shortcomings, and at the same time creates a clear understanding of the correctness of the carbon-free technological structure in the development of clean energy for the planet. An extremely important scientific and technical task at all times of humanity's development is the task of extracting energy in all its forms and using energy in all possible ways, both for the development of humanity, which is the task of the rational part of humanity, and for its destruction, which is the task of the insane part of humanity. Human scientific thought has always worked and continues to work towards understanding.

Keywords: second law of thermodynamics, Maxwell's Demon principle, corpuscular energy mechanics, new technological paradigm, solar constant, low-temperature electricity generation, and carbon-free energy.

Citation: Bayakin S. G., Tsuglenok N. V. P'yanykh T. A. The Second Law of Thermodynamics, in its Current Form, And Low-Temperature Energy Generation in the Arctic Zone. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(2), 172–181. EDN: CVTFQL



© Siberian Federal University. All rights reserved

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

* Corresponding author E-mail address: mitra53@mail.ru

Второй закон термодинамики в актуальном изложении и перспектива низкотемпературной энергогенерации

С. Г. Баякин^а, Н. В. Цугленок^б, Т. А. Пьяных^в

^аИнститут космических технологий ФИЦ КНЦ СО РАН
Российская Федерация, Красноярск

^бАНО ДПО «Научно-образовательный и производственный
центр Солнечно-Земной энергетики и биоэнергетики СО РАН»

Российская Федерация, Красноярск

^вСибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. Современный энергетический уклад нацелен на применение безуглеродных источников энергии во всех направлениях – промышленности, транспорта, авиации, бытовой сфере. Многолетняя практика развития безуглеродных генерирующих решений в направлении гидроэнергетики, ветроэнергетики, солнечной световой и солнечной тепловой энергетики, высокотемпературной геотермальной энергетики показывает жизнеспособность безуглеродного технологического уклада, выявляет недостатки и в то же время создает однозначное понимание правильности безуглеродного технологического уклада в развитии чистой энергетики планеты. Перспективный технологический уклад, а именно безуглеродная генерация электрической энергии из низкотемпературных источников (солнечное излучение, воздух, грунт, вода, избыточное тепло АЭС и промышленных комплексов), позволяет обеспечить большую часть мировой потребности в электрической энергии.

Ключевые слова: второй закон термодинамики, принцип «Демон Максвелла», корпускулярная энергомеханика, новый технологический уклад, солнечная постоянная, низкотемпературная электрогенерация, безуглеродная энергетика.

Цитирование: Баякин С. Г. Второй закон термодинамики в актуальном изложении и перспектива низкотемпературной энергогенерации / С. Г. Баякин, Н. В. Цугленок, Т. А. Пьяных // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(2). С. 172–181. EDN: CVTFQL

*«Доступная энергия – это главный объект,
поставленный на карту в борьбе
за существование и эволюцию мира»*

Людвиг Больцман

Введение

Актуальные данные обобщенного мирового применения видов энергии представлены на диаграмме (рис. 1). Из левой части диаграммы следует, что уголь и углеводороды в мировом объеме составляют 86,7 %, а безуглеродные виды энергии, включая атомную, – 13,3 %.

Мировыми лидерами безуглеродной электрогенерации являются Китай и Великобритания. На правой части рис. 1 видно, что в Китае безуглеродные виды электрогенерации – ГЭС, АЭС, ВЭС, СЭС – в 2024 г. составили 46,8 %, в Великобритании 64,1 % а тепловая электрогенерация на сжигаемом топливе в Китае снизилась до 63,2 %, в Великобритании 36,9 %. Более чем красноречивая информация о тенденции развитии нового мирового энергетического уклада.

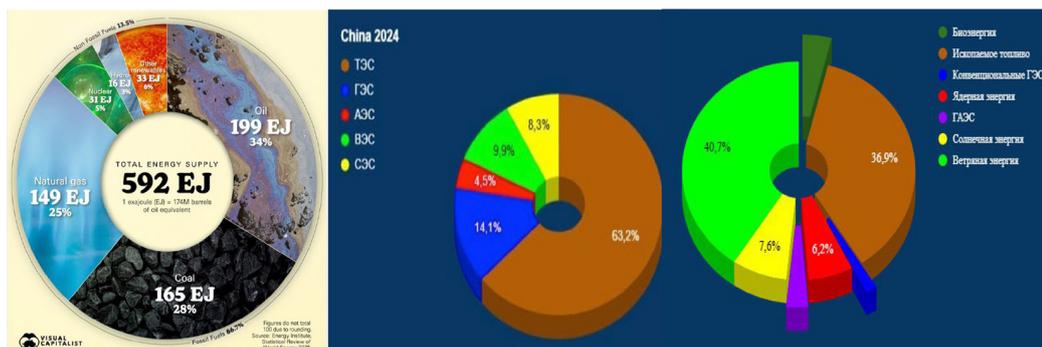


Рис. 1. Диаграммы потребления видов энергии в мире, Китае и Великобритании

Fig. 1. Energy consumption charts for the world, China, and the UK

На основе современных знаний в части физики энергии частиц, физики волновой энергии, а также с позиции корпускулярно-волнового дуализма и логики понимания предлагается применить обобщающий термин раздела физики «Энергомеханика». При этом к физике энергии частиц применить термин «Корпускулярная энергомеханика», а к физике волновых процессов – «Волновая энергомеханика».

Предлагаемая терминология имеет основу фундаментальной гипотезы об универсальности мироздания в аспекте корпускулярно-волнового дуализма, выдвинутого французским учёным Луи де Бройлем в 1923 году. В основе лежит понимание того, что электрическая энергия является проявлением как корпускулярно-волнового взаимодействия, так и дуализма, в соответствии с фундаментальными законами классической физики в классическом математическом аппарате, описывающем связь волновой энергии и энергии движения материи, а именно: $E = \frac{mv^2}{2}$ – формула кинетической энергии; $E = hv$ – формула волновой энергии, из которых следует материально-волновая связь мироздания посредством энергии, которая выражается так:

$$hv = \frac{mv^2}{2}, \quad (1)$$

где h – постоянная Планка; v – частота волны; m – масса; v – скорость.

К пониманию сущности энергии наиболее обоснованно и фундаментально подошел великий английский ученый, физик, математик, механик и астроном Исаак Ньютон, один из создателей классической физики, автор фундаментального труда «Математические начала натуральной философии», в котором изложен закон всемирного тяготения и три закона механики, ставшие основой классической физики.

Понимание тепловой энергии предложил великий русский ученый М. В. Ломоносов, который исключил существовавшее ранее понятие теплорода и представил понятие теплоты следующим образом:

1. «В движении какой-то материи» – так как «при прекращении движения уменьшается и теплота», а «движение не может произойти без материи»;
2. «Во внутреннем движении материи», так как недоступно чувствам;
3. «Во внутреннем движении собственной материи» тел, то есть «не посторонней»;

4. «Во вращательном движении частиц собственной материи тел», так как существуют весьма горячие тела без двух других видов движения «внутреннего поступательного и колебательного», например, раскалённый камень покоится (нет поступательного движения) и не плавится (нет колебательного движения частиц).

Тем самым М. В. Ломоносов доказал, что причиной теплоты является внутреннее движение связанной материи, что полностью соответствует физике Ньютона. Термодинамика появилась как эмпирическая наука об основных способах преобразования внутренней энергии тел для совершения механической работы.

Коллективным трудом Рудольфа Клаузиуса, Уильяма Томсона, Людвиг Больцмана и Вальтера Нернста выполнен основной вклад в разработку и понимание второго закона термодинамики и сформулированы четыре начала термодинамики:

1. *Нулевое начало термодинамики* – термодинамическое равновесие;
2. *Первое начало термодинамики* – это закон сохранения и превращения энергии для термодинамической системы;
3. *Второе начало термодинамики. Формулировка Клаузиуса*: теплота не может самопроизвольно переходить от тела менее нагретого к более нагретому;
4. *Третье начало термодинамики (тепловая теорема Нернста)* – физический принцип, определяющий поведение энтропии при приближении температуры к абсолютному нулю.

Самыми спорными и проблемными выглядят трактовки второго закона термодинамики. А именно:

- 1) «теплота не может самопроизвольно переходить от тела менее нагретого к более нагретому»;
- 2) «циклический процесс, единственным результатом которого является производство работы за счет уменьшения внутренней энергии только одного теплового резервуара, также будет невозможен».

Теоретическое обоснование и практическое подтверждение принципа «Демон Максвелла», актуальное изложение второго закона термодинамики

Сомнение по формулировке Клаузиуса было выражено в декабре 1867 года, когда Джеймс Клерк Максвелл в письме к Питеру Тейту высказал идею устройства, нарушающего второй закон термодинамики. Через четыре года он представил ее в монографии «Теория тепла». В 1874 году другой великий физик Уильям Томсон назвал это устройство «Демон Максвелла».

Мысленный эксперимент Джеймса Максвелла состоит в следующем: сосуд разделён непроницаемой перегородкой на две части: правую и левую. В перегородке есть отверстие с устройством, которое позволяет пролетать быстрым (горячим) молекулам газа только из левой части сосуда в правую, а медленным (холодным) молекулам – только из правой части сосуда в левую. Тогда через большой промежуток времени (горячие) – (быстрые) молекулы окажутся в правом сосуде, а (холодные) останутся в левом. Таким образом, получается, что «Демон Максвелла» позволяет нагреть правую часть сосуда и охладить левую без дополнительного подвода энергии к системе.

Это на первый взгляд. Но при более детальном изучении становится очевидным, что если рассмотреть замкнутую систему, включающую в себя демона и сосуд, то для функционирова-

ния самого «Демона Максвелла» ему необходима энергия от какого-либо, например, внешнего источника. Тогда за счёт этой внешней энергии и производится разделение горячих и холодных молекул в сосуде, то есть переход в состояние с меньшей энтропией, но в этом случае система не будет замкнутой. Тем не менее этот парадокс со своим экстравагантным названием привлекал и привлекает внимание многих весьма известных ученых и изобретателей.

В 1929 году приват-доцент Берлинского университета Лео Сциллард – участник создания первого ядерного реактора в США, чисто математически попытался связать информацию и энергию, где информация являлась бы механизмом работы «Демона Максвелла». Задачу продолжил решать Рольф Ландауэр, который развил идеи Сцилларда, введя понятие принципа Ландауэра. Этот принцип утверждает, что любое уничтожение информации связано с минимальными потерями энергии, пропорциональными температуре окружающей среды.

В 1982 году Чарльз Беннетт, опираясь на теорию информации, предложил ещё одну интерпретацию Демона Максвелла, которая показывает, что конечный объём памяти обязательно приведёт к уничтожению информации, что, в свою очередь, является термодинамически необратимым процессом. Он также предложил алгоритм вычисления разности свободных энергий двух систем, который получил название метод «Bennett acceptance ratio». ([https://web.archive.org/web/20191128134426/https://ru.wikipedia.org/wiki/Беннетт,_Чарльз_\(физик\)](https://web.archive.org/web/20191128134426/https://ru.wikipedia.org/wiki/Беннетт,_Чарльз_(физик))).

Идеи Лео Сцилларда, Рольфа Ландауэра, Чарльза Беннетта выражают фундаментальную задачу современной науки – выявление связи двух ключевых основ мироздания – энергии и информации.

Далее, но уже с позиций физики пошел Марк Рейзен, который считал, что атомы или молекулы газа могут находиться *в двух долгоживущих метастабильных квантовых состояниях* и что существует множество веществ, отвечающих этому требованию.

Главный вывод из этих теоретических исследований и экспериментов – это факт нахождения замкнутой термодинамической системы *в двух устойчивых метастабильных квантовых состояниях* также предполагает пересмотр второго начала термодинамики и возможность реализации идеи «Демон Максвелла» в атомарно-квантовой области.

Теоретические и экспериментальные работы в этом направлении продолжают многими научными сообществами. Наиболее интересны четыре примера:

1. Равенство Ярзинского – это уравнение в статистической механике, которое связывает разности свободной энергии между двумя состояниями и необратимую работу вдоль ансамбля траекторий, соединяющих одни и те же состояния. Оно названо в честь физика Кристофера Ярзинского, который вывел его в 1996 г. По сути, равенство Ярзинского указывает на тот факт, что колебания работы удовлетворяют определенным ограничениям отдельно от среднего значения работы, возникающей в некотором процессе.

2. В 2010 г., по сообщению в *New Scientist*, мысленный эксперимент «Демона Максвелла» якобы удалось воплотить в реальность физикам из университетов Тюо (яп. 中央大学) (Chuo University) и Токио (University of Tokyo). Японцы создали два связанных шарика полистирола диаметром 0,3 микронметра каждый. Один находился на поверхности стекла, второй мог вращаться вокруг первого. Новый эксперимент, описанный в статье в *Nature Physics*, позволил также проверить уравнение Ярзинского.

3. Далее в 2015 г. физики из Финляндии, США и России (Иван Хаймович из Института физики микроструктур Российской академии наук) создали автономного искусственного «Демона Максвелла».

4. В 2025 г. физики из Университета Штутгарта профессор Эрик Луц и докторант Милтон Агилар показали, что на атомном уровне классический принцип Карно перестаёт действовать в привычной форме. Авторы разработали математическую модель, которая позволяет оценивать эффективность квантовых машин, способных извлекать энергию не только из тепла, но и из самих корреляций между частицами. Это означает, что на атомном уровне двигатель может использовать внутренние состояния системы, превращая взаимосвязь частиц в дополнительный источник энергии. Исследователи подчёркивают, что речь идёт не об отмене второго закона термодинамики, а о его расширении (securitylab.ru/news/564768.php).

Практически все современные попытки реализовать техническим образом демона Максвелла находятся в области микромира и квантовой физики, в то же время Максвелл рассматривал работу демона в области классической физики. Очень точно это выразил Людвиг Больцман, который представил второй закон термодинамики, связав энтропию с вероятностью распределения частиц (корпускул).

Исходя из вышеизложенных представлений о сущности энергии в аспекте классических законов физики материальных объектов, предлагается сформулировать отдельное направление в области макроскопической физики как «Корпускулярная энергомеханика».

С целью подтверждения реальности процесса автономного переноса энергии в равновесной термодинамической системе с переходом в метастабильное состояние следует обратить внимание на три природных процесса.

Первый пример. Явление осмоса, которое естественным образом ярко демонстрирует реальность мысленного эксперимента Джеймса Максвелла и объясняется формулировкой Людвиг Больцмана.

Общеизвестный эксперимент, в котором имеется сосуд как термодинамическая система, разделённый проницаемой мембранной перегородкой на две части – левую и правую, в которых находятся две равные по массе, температуре и, соответственно, по количеству энергии части раствора жидкости. При равных массе и температуре растворы жидкости отличаются только концентрацией, то есть количеством растворителя (далее пусть будет воды) и количеством растворённых молекул вещества.

Перегорodka частей сосуда представляет собой мембрану, как, например, в яичной скорлупе, где с внутренней стороны природная мембрана пропускает молекулы воды и задерживает молекулы сахара. Если такой природной мембраной разделить растворы сахара с концентрацией 5 и 10 % соответственно, то через неё в обоих направлениях будут проходить только молекулы воды.

Поскольку в левой части сосуда удельное количество молекул воды больше, чем в правой части, соответственно, количество молекул воды, проникающих в правую часть сосуда, больше. Следовательно, из левой части сосуда в правую часть поступает вода за счёт уменьшения массы воды и, соответственно, внутренней энергии в левой части сосуда, при этом без какого-либо внешнего воздействия – исключительно за счёт уменьшения внутренней энергии левой части сосуда.

Физика данного процесса объясняется наличием большей вероятности проникновения через мембрану большего количества молекул воды из раствора с меньшей концентрацией, в раствор с большей концентрацией, то есть из левой части в правую часть термодинамической системы. Таким образом, роль так называемого «Демона Максвелла» выполняет мембрана, которая позволяет переместить в правую часть сосуда и извлечь из левой части сосуда некую массу воды и, соответственно, энергии без дополнительного подвода энергии к системе до выравнивания концентраций растворов в обеих частях сосуда и перехода термодинамической системы в квазистабильное состояние с разным количеством энергии в обеих частях сосуда. Общеизвестная схема процесса осмоса представлена на рис. 2.

Неопровержимое экспериментальное доказательство принципа «Демон Максвелла» с использованием эффекта осмоса представили инженеры японского города Фукуока, которые в 2025 г. запустили осмотическую электростанцию с ежегодной выработкой 880 000 кВт·ч.

На станции в Фукуоке по одну сторону мембраны подается пресная вода, а по другую – морская. Вода, стремясь перейти к соленой стороне, повышает давление, и возникающий поток вращает турбину, соединенную с генератором (globalenergyprize.org/ru/2025/08/29/v-japonii-otkryli-pervuju-osmoticheskiju-jelektrostantsiju/).

Главное отличие этой технологии от ветровой и солнечной энергетики в том, что источник энергии доступен круглосуточно, независимо от погоды. Это первый объект такого типа в Японии и второй в мире. Первая аналогичная промышленная установка была сконструирована в Дании в 2023 г.

Второй пример. Выделение энергии в процессе фазового перехода вода-лёд. Феномен энергии фазового перехода вода-лёд заключается в том, что вода при охлаждении на один градус выделяет энергию 4,1 Дж/г за счёт снижения кинетической энергии молекул, а при переходе из фазового состояния воды в лёд при разнице температур также на один градус от 0 до –1, то есть при кристаллизации молекул воды, утрате подвижности молекул и, соответственно, кинетической энергии лёд выделяет удельное количество энергии 334 Дж/г, что больше в 81,5 раза. При этом плотность льда снижается до 900 кг/м³, при плотности воды 1000 кг/м³. Таким образом, при кристаллизации молекул воды область льда освобождается от каждой десятой подвижной молекулы, которые перемещают в область воды кинетическую энергию.

Ещё одно уникальное свойство фазового перехода вода-лёд – это опреснение воды, то есть вытеснение из области льда в область воды молекул соли и не только. В результате кристаллизирующиеся молекулы воды передают свою кинетическую энергию вытесняемым из об-

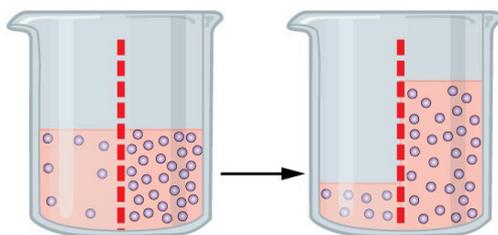


Рис. 2. Схема процесса осмоса

Fig. 2. Schematic diagram of the osmosis process

ласти льда подвижным молекулам, что соответствует предположению Джеймса Максвелла о так называемых горячих молекулах, переносящих энергию от холодного тела к более нагретому, в данном случае ото льда к воде. Уникальное природное свойство воды является одним из принципиальных обстоятельств существования земной биосферы в её современном виде.

Наиболее вероятно, что именно этот физический процесс при среднегодовой температуре воздуха в Арктике примерно $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ и поверхностных вод $-1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ не позволяет промёрзнуть Северному Ледовитому океану на значительно большую глубину, чем в среднем до 4–6 метров вблизи Северного полюса. Причина, вероятно, в том, что энергия фазового перехода в виде кинетической энергии 10 % молекул воды и также молекул соли, вытесняемых из области льда в область соленой морской воды, создаёт молекулярно-энергетический барьер между льдом и морской водой. При гексагональной форме образования кристаллов льда удельная плотность энергии по площади молекулярно-энергетического барьера толщиной 0,01 м имеет расчётное значение $334\,000\text{ кДж/м}^2$.

Таким образом, средневзвешенный интегрированный процесс передачи энергии от низкотемпературной части системы (лёд $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$) к более нагретой части системы (вода $-1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$) в термодинамической квазистабильной системе лёд-вода Северного Ледовитого океана обеспечивается уникальными свойствами фазового перехода воды.

Превалирование описанного глобального термодинамического процесса, препятствующего глубокому промерзанию Северного Ледовитого океана над другими факторами теплообмена, подтверждается также недоступностью тёплых океанических течений, ограниченных континентальными барьерами, а также наличием холодного Восточного антициклонического круговорота в Северном Ледовитом океане. Следует отметить, что влияние геотермальной энергии ядра земли на температуру воды в Северном Ледовитом океане крайне незначительно, не более 0,02 % от солнечной.

Ещё один актуальный факт исследования свойств льда изложен в официальном Телеграм-канале ассоциации «Глобальная энергия» (<https://t.me/globalenergyprize>). «*Лёд реагирует, создаёт, преобразует энергию – и, возможно, в будущем его свойства найдут применение в новых источниках энергии или устройствах для сбора заряда из окружающей среды*».

Представленные на рис. 2, 3 схемы перемещения молекул воды с высокой кинетической энергией в процессе осмоса и в процессе фазового перехода вода-лёд позволяют естественными природными явлениями подтвердить реальность принципа «Демон Максвелла» и необходимость пересмотра формулировки второго закона термодинамики с целью применения новых знаний для технической реализации принципа генерации энергии из низкотемпературных источников, что крайне актуально для Арктической зоны РФ и не только.

Третий пример. Тепловой насос – устройство для переноса тепловой энергии от низкотемпературного источника к высокотемпературному потребителю. Физической основой создания устройства является природное свойство сжимаемых рабочих тел (в основном фреонов), которые потребляют количество энергии сжатия в разы меньше, чем количество энергии, перемещаемой рабочим телом из низкотемпературной области (например, из холодильника) в высокотемпературную область.

В отличие от самопроизвольной передачи тепловой энергии, которая в основном происходит от горячего тела к холодному, тепловой насос переносит тепло в обратном направлении.

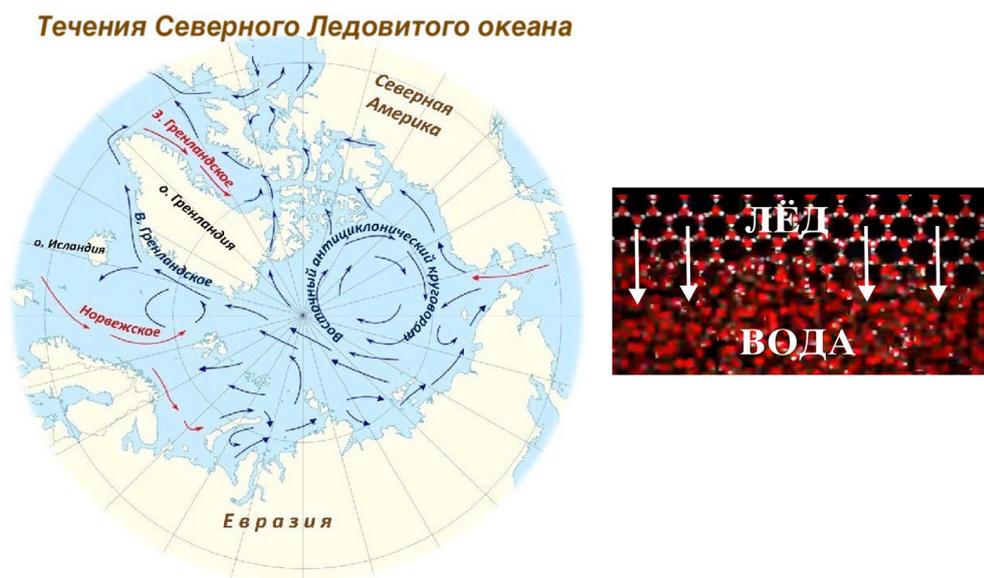


Рис. 3. Схема течений в Северном Ледовитом океане и схема перемещения молекул воды при образовании льда

Fig. 3. Schematic diagram of currents in the Arctic Ocean and diagram of the movement of water molecules during ice formation

Соотношение перемещаемой компрессором тепловой энергии и потребляемой электрической или механической энергии называется коэффициентом трансформации COP от английского – coefficient of performance и служит показателем эффективности теплового насоса. В широкой практике теплонасосов COP находится в пределах 2–7, в экономически эффективном техническом применении около 4.

Важную роль в трансформации тепловой энергии в механическую играет принцип двигателя Стирлинга – теории цикла Стирлинга не существовало до появления работы Сади Карно. Карно разработал и опубликовал в 1825 г. общую теорию работы тепловых двигателей – Цикл Карно, из которой следует, что работа двигателя Стирлинга соответствует этой теории. Основное преимущество принципа работы двигателя Стирлинга – возможность преобразовывать в работу любую разницу температур, заключается в постоянно чередуемых нагревании и охлаждении рабочего тела в закрытом цилиндре (https://ru.wikipedia.org/wiki/Двигатель_Стирлинга). Термодинамический цикл Стирлинга, демонстрационная модель и схема работы двигателя представлены на рис. 4. Схема наглядно демонстрирует возможность получения механической работы в арктической термодинамической системе лёд–вода со среднегодовой усредненной разницей температур льда $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ и воды $-1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

С учётом того, что КПД современных конструкций двигателей Стирлинга может достигать 80 %, а источник низкотемпературной тепловой энергии в зоне Арктики практически безграничен и постоянно пополняется Солнцем, процесс экологически нейтральной низкотемпературной электрогенерации в Арктике выглядит не только возможным, но и высокоэффективным как для стационарных объектов, так и для водного арктического транспорта на электрическом приводе.

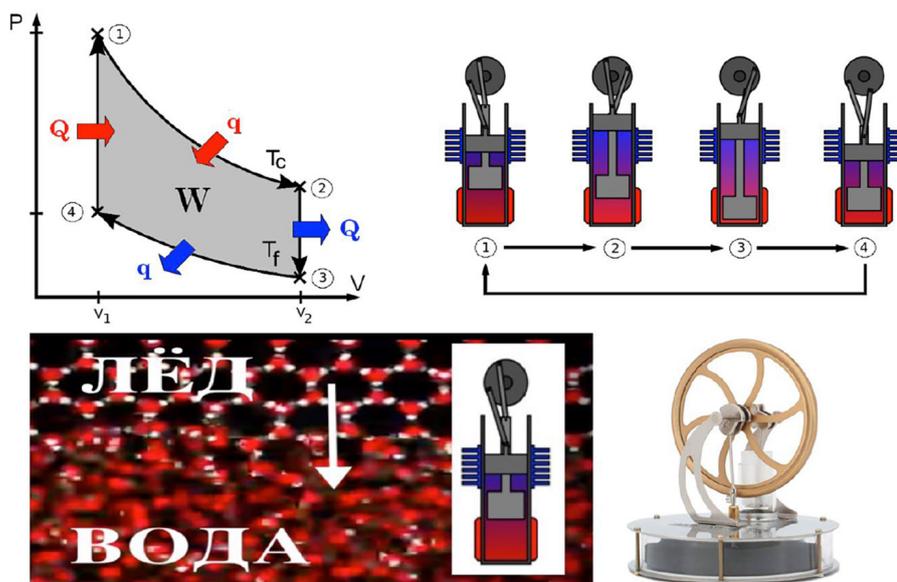


Рис. 4. Термодинамический цикл Стирлинга, демонстрационная модель и схема работы двигателя Стирлинга в системе лёд-вода

Fig. 4. Thermodynamic Stirling cycle, demonstration model, and diagram of a Stirling engine operating in an ice-water system

В рамках классической фундаментальной физики, на основании изложенного, следуют выводы:

1. На уровне как молекулярных, атомарных и субатомных частиц (корпускул), так и на макроуровне существуют устойчивые термодинамические системы с метастабильным состоянием.

2. Метастабильное состояние в термодинамических системах формулирует уравнение Ярзинского $\Delta F = Fa - Fb$ при $\Delta F = A$, где: ΔF – разность энергий двух частей термодинамической системы, а A – работа, совершаемая этой разницей энергий.

3. Часть работы A хотя бы одной корпускулы термодинамической системы возможно применить в качестве работы по принципу «Демон Максвелла», а другую часть работы A – для внешнего потребителя.

4. Вероятность разделения движущихся корпускул одновременно на две равные части как по количеству корпускул, так и по количеству суммарной энергии движущихся корпускул, стремится к нулю при увеличении числа разделяемых корпускул.

Главный вывод заключается в следующем – закрытая корпускулярная термодинамическая система, в которой тепловая энергия представлена в виде суммы кинетических энергий корпускул

$Q = \sum_1^n 0,5m_n v_n^2$, состоящая из двух разделенных частей, обладает разницей энергии

частей и возможностью за счет этой разницы увеличения энергии одной из частей системы и совершения работы для внешнего потребителя.

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

EDN: AREQLN

УДК 669.21:669.053.4

Comparative Characteristics of Gold Extraction Methods (Cyanide, Thiosulfate, Thiourea, Chloride)

Kholmahmad I. Kholov*

*V.I. Nikitin Institute of Chemistry, ASR of Tajikistan
Dushanbe, Republic of Tajikistan*

Received 27.10.2025, received in revised form 11.01.2026, accepted 28.01.2026

Abstract. This paper presents a comparative assessment of four hydrometallurgical routes for gold recovery—cyanide, thiosulfate, thiourea, and chloride—benchmarked by extraction efficiency, toxicity, costs, and waste management requirements. Mineralogical constraints (refractoriness, carbonaceous matter, sulfide locking) are highlighted to show that solvent selection must consider not only final extraction levels but also dissolution rate, impurity sensitivity, and the need for pre-treatment. Typical performance windows are summarized: 90–95 % for amenable ores under cyanidation; comparable results for thiosulfate and thiourea flowsheets on carbonaceous and stibnite-rich feeds; and high recoveries for chloride systems when redox and acidity are tightly controlled. Direct reagent costs are generally lowest for cyanide because of low dosage and mature equipment, whereas thiosulfate demands higher make-up and specific regeneration; thiourea and chlorine-bearing reagents increase effluent treatment costs and materials requirements. Detox and cleanup blocks are outlined: SO₂ / air (INCO) for cyanide, precipitation and biodestruction for ammoniacal thiosulfate, oxidative destruction and neutralization for thiourea, and gas/liquid treatment with salt balance for chloride circuits. Hybrid routes (gravity/flotation + leaching) help tailor the process to ore type while controlling environmental risk and unit cost.

Keywords: gold, cyanide leaching, thiosulfate leaching, thiourea, chloride leaching, refractory ores, efficiency, toxicity, waste management, environmental risks, process cost, hybrid flowsheets, reagent regeneration, wastewater treatment.

Citation: Kholov Kh. I. Comparative Characteristics of Gold Extraction Methods (Cyanide, Thiosulfate, Thiourea, Chloride). *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2026, 19(2), 182–201. EDN: AREQLN



© Siberian Federal University. All rights reserved

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

* Corresponding author E-mail address: Kholmahmad90@mail.ru

Сравнительная характеристика методов извлечения золота (цианид, тиосульфат, тиомочевина, хлорид)

Х. И. Холов

*Институт химии имени В. И. Никитина НАН Таджикистана
Республика Таджикистан, Душанбе*

Аннотация. В статье выполнен сравнительный анализ гидрометаллургических методов извлечения золота – цианидного, тиосульфатного, тиомочевинного и хлоридного – по критериям эффективности, токсичности, стоимости и утилизации отходов. Рассмотрены технологические ограничения, связанные с минералогией руд (упорность, углистое вещество, сульфидная матрица), и показано, что выбор растворителя должен определяться не только предельной степенью извлечения, но и скоростью процесса, чувствительностью к примесям и необходимостью предварительного вскрытия минералов. Систематизированы данные о диапазонах извлечения: для легкообогатимых руд типичны 90–95 % при цианировании; тиосульфатные и тиомочевинные схемы обеспечивают сравнимые показатели на углистых и сурьмяных рудах; хлоридные системы достигают высоких значений при строгом контроле окислительно-кислотных условий. Отмечено, что наименьшие прямые реагентные затраты характерны для цианида за счёт малого расхода и отработанности оборудования, тогда как тиосульфат требует заметно большей дозировки и специфической регенерации, а тиомочевина и хлорсодержащие реагенты удорожают очистку сточных вод и материалов. Рассмотрены блоки обезвреживания: INCO-процесс для цианида, осаждение и биодеструкция для аммиачно-тиосульфатных растворов, окислительная деструкция и нейтрализация для тиокарбамида, а также газо- и водоочистка с солевым балансом для хлоридных схем. Показано, что комбинированные маршруты (гравитация/флотация + выщелачивание) позволяют адаптировать технологию к конкретной руде, минимизируя экологический риск и себестоимость при заданной металлургической извлекаемости. Сформулированы практические ориентиры по выбору растворителя: цианид – для «простых» руд при наличии строгой экологической дисциплины; тиосульфат – для углистых и «preg-robbing» систем; тиомочевина – для сурьмянистых и высокореакционных концентратов; хлоридные системы – как нишевый вариант при наличии герметичных коррозионностойких аппаратов и замкнутых водных контуров.

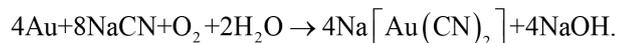
Ключевые слова: золото, цианидное выщелачивание, тиосульфатное выщелачивание, тиомочевина, хлоридное выщелачивание, упорные руды, эффективность, токсичность, утилизация отходов, экологические риски, стоимость процесса, комбинированные схемы, регенерация реагента, очистка сточных вод.

Цитирование: Холов Х. И. Сравнительная характеристика методов извлечения золота (цианид, тиосульфат, тиомочевина, хлорид) / Х. И. Холов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(2). С. 182–201. EDN: AREQLN

Введение

Золото относится к благородным металлам и обладает уникальными свойствами – химической инертностью и высокой электро- и теплопроводностью, что обусловило его широкое применение в электронике, ювелирном деле и финансовом секторе [1]. Высокая стоимость золота и его крайне низкое среднее содержание в породах требуют переработки огромных масс низкосортных руд для извлечения небольших количеств металла [2]. Для решения этой задачи более ста лет используется гидрометаллургический метод цианидного выщелачивания, предложенный еще в конце XIX века. Цианид натрия (NaCN) в присутствии кислорода эффективно растворяет золото, образуя растворимые комплексы, и за счет высокой извлекающей способности и сравнительно

низкой стоимости реагента цианидный метод доминирует в промышленности на протяжении десятилетий [3]. Химическая реакция растворения золота в цианидном растворе в присутствии кислорода до получения дицианоаурата натрия выглядит следующим образом [4, 5]:



Как отмечают Т. Ю. Никитина и Г. В. Петров [6], в настоящее время более 90 % мирового годового производства золота осуществляется с применением цианидного выщелачивания, что фактически делает эту технологию отраслевым стандартом. Вместе с тем, по данным Н. Т. Шарифбоева [7], столь широкое распространение цианидного метода сопровождается серьезными экологическими и социальными рисками, что стимулирует поиск альтернативных, менее токсичных реагентов.

Цианид – чрезвычайно токсичный реагент, представляющий смертельную опасность для человека и экосистем [8]. Исторически утечки цианидов на золотоизвлекательных предприятиях приводили к экологическим катастрофам [9]. Классическим примером, подробно описанным в работе Х. И. Холова и соавт. [10], является авария на румынском предприятии «Бая-Маре» (2000 г.), когда разрыв дамбы хвостохранилища вызвал выброс более 100 000 м³ цианидсодержащих сточных вод, приведший к массовой гибели рыбы и длительному загрязнению рек бассейна Дуная. Подобные инциденты обострили внимание общественности к проблемам экологической безопасности горнодобывающей отрасли [11]. В результате в ряде стран мира введены законодательные запреты на использование цианидных технологий добычи золота, а во многих регионах действуют строгие нормативы хранения и нейтрализации цианидсодержащих отходов [12]. Действительно, помимо острого токсического воздействия цианидная технология требует значительных затрат на обезвреживание и надежное хранение отходов [13]: перед складированием хвостов необходима химическая детоксикация цианидных растворов (например, диоксидом серы) для снижения риска утечек.

Как подчеркивают Н. Ю. Самсонов с соавт. [14, 15] и О. Н. Кононова с соавт. [16], цианидный метод также имеет ряд технико-экономических ограничений: он не обеспечивает полного извлечения металла из упорных руд, содержащих углеродистые и сульфидные минералы, из-за эффекта сорбционного поглощения золота (*preg-robbing*) и затруднённого взаимодействия с реагентом. В итоге значительная часть золота остаётся в твёрдых хвостах, что снижает эффективность и усложняет утилизацию отходов.

Следовательно, как справедливо отмечают Б. Х. Тусупова и Ж. Д. Байгулин [17], несмотря на широкое распространение цианидного выщелачивания благодаря его эффективности и экономичности, растущие экологические риски и технологические ограничения делают актуальным поиск альтернативных, менее токсичных методов извлечения золота.

В последние десятилетия ведутся интенсивные исследования, направленные на разработку альтернативных реагентов для извлечения золота, которые были бы менее опасными для окружающей среды, но сохраняли бы высокую селективность и степень извлечения металла [18]. Среди традиционных нецианидных выщелачивателей наибольшее внимание привлекли тиосульфатные [19], тиомочевинные [20] и хлоридные методы выщелачивания золота [21]. Каждая из этих технологий обладает своими преимуществами и недостатками с точки зрения эффективности, безопасности и экономических издержек по сравнению с цианидным процессом.

В данной статье рассмотрены методы гидрометаллургического извлечения золота из руд: классическое цианидное выщелачивание, а также альтернативные безцианидные методы – на основе тиосульфата, тиомочевины (тиокарбамида), ацетилтиомочевины и хлоридного (галогидного) выщелачивания. Сравнение проведено по основным ключевым аспектам: токсичность применяемых реагентов, эффективность извлечения золота, стоимость и ресурсозатраты процесса, экологические риски, а также сложность утилизации отходов. В табл. 1 приведено обобщённое сравнение и последующий анализ по каждому из указанных аспектов.

Методы исследования

Исследование носит обзорный характер и основано на систематизации опубликованных данных по современным гидрометаллургическим методам извлечения золота. Используются сравнительно-аналитические подходы с привлечением результатов лабораторных и промышленных испытаний, отражённых в научных статьях, отчетах, патентах и книгах. Проведён критический анализ эффективности, стоимости, токсичности и экологической безопасности процессов цианидного, тиосульфатного, тиомочевинного и хлоридного выщелачивания. При подготовке обзора применены методы контент-анализа, обобщения и сопоставления технологических параметров. Полученные выводы имеют обобщающий характер и служат основой для выбора рациональной схемы выщелачивания золота из руд различного минералогического типа.

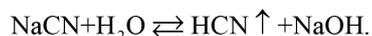
Таблица 1. Сравнение основных характеристик методов извлечения золота

Table 1. Comparison of the main characteristics of gold extraction methods

Аспект	Цианидное выщелачивание	Тиосульфатное выщелачивание	Тиомочевина (тиокарбамид)	Хлоридное выщелачивание
Токсичность	Очень высокая, смертельно ядовит NaCN; требует строгой безопасности	Низкая, реагенты нетоксичны, экологичны [6]	Умеренная, возможна канцерогенность; требует защиты	Высокая, хлор и HCl опасны, нужны герметичные реакторы [22]
Эффективность извлечения	90–95 % (легкие руды), ниже для упорных [24]	85–90 %, эффективен при углистых рудах [23]	>90 %, быстрое растворение, устойчив к As, Sb [7]	До 95 %, но требует сильного окислителя и контроля среды
Стоимость процесса	Низкая, реагенты дешёвые, технология отработана	Средняя, большой расход реагента, сложная схема (Cu, NH ₃) [23]	Относительно высокая, расход 5–10 кг/т, кислая среда [24]	Средне-высокая, недорогие реагенты, но дорогое оборудование
Экологические риски	Очень высокие, частые аварии и токсичные стоки [24]	Низкие, но нужно очищать от Cu ²⁺ и NH ₃ [24]	Средние, требует нейтрализации и утилизации [10]	Высокие, опасность выброса хлора и кислотных стоков [22]
Утилизация отходов	Детоксикация (SO ₂ /воздух, H ₂ O ₂), контроль CN ⁻ < 10 мг/л	Простая нейтрализация и окисление до сульфатов [10]	Специальная щёлочная и окислительная обработка [23]	Нейтрализация кислот, осаждение гидроксидов, солевые стоки

Токсичность и экологическая опасность

Цианидный метод отличается крайне высокой токсичностью основного реагента и продуктов [25]. Цианид натрия (NaCN) – сильнодействующий яд, смертельный для человека в дозах порядка нескольких миллиграммов на килограмм массы [6, 10]. При проведении процессов цианидного выщелачивания золота необходимо поддерживать щелочную среду ($\text{pH} > 10,5$), что достигается добавлением извести $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Это предотвращает протекание реакции разложения цианида с образованием летучего и высокотоксичного синильного газа HCN [26]:



Исследования К. К. Размахнина и П. А. Василюка [27] подтверждают, что нарушение данного режима способно привести к выделению HCN и острому отравлению рабочих или загрязнению атмосферы. При этом, как отмечает Н. В. Воробьёв-Десятовский [28], даже незначительные утечки цианистых соединений представляют угрозу живым организмам, а их высокая реакционная активность требует особых мер безопасности на всех стадиях технологического процесса.

При pH ниже 10,5, как подчёркивают М. Н. Макарова и др. [26], а также авторы [27], равновесие смещается в сторону образования летучего и крайне токсичного HCN ; тогда как при поддержании щелочной среды ($\text{pH} > 10,5$) ион цианида (CN^-) остаётся в устойчивой форме. Тем не менее любые утечки цианида немедленно создают угрозу живым организмам: цианид быстро блокирует дыхательные ферменты и вызывает гибель людей и животных. По сведениям Н. Т. Шарифбоева [7], к крупным авариям, связанным с цианидами, относится разлив на румынском руднике Бая-Маре (2000 г.), когда в реки попало порядка 100 т цианидосодержащих стоков, что уничтожило биоту на десятки километров. Высокая токсичность вызвала общественный резонанс и регуляторные меры: как отмечают С. С. Тимофеева с соавт. [29] и А. Е. Воробьёв с соавт. [30], а также авторы [31], в ряде стран Европы и США введены запреты на применение цианидных технологий, тогда как в мировой практике их используют лишь при строгом соблюдении требований промышленной безопасности (включая положения Международного кодекса по цианиду). Существенные экологические риски обусловлены не только прямой токсичностью CN^- , но и долговременным воздействием производных: по данным М. К. Хочиена [32], цианаты и тиоцианаты могут сохраняться в окружающей среде годами. Дополнительно, как показывают Л. В. Бикетова с соавт. [33], присутствие CN^- способствует мобилизации тяжёлых металлов из минеральной матрицы, усиливая их миграцию и распространение в экосистемах. В совокупности это делает цианидный метод наиболее экологически опасным среди альтернативных технологий.

Альтернативные безцианидные подходы существенно выигрывают по показателям экологической безопасности, хотя и не лишены рисков. Так, по данным А. Е. Воробьёва и соавт. [33] и Х. И. Холова с соавт. [24], тиосульфатное выщелачивание считается более «мягким»: сам тиосульфат-ион нетоксичен для человека и большинства организмов, а рабочие растворы аммиачного тиосульфата не содержат летучих ядов. Исследования CSIRO показывают [34], что применение тиосульфата заметно снижает экологические риски по сравнению с цианидом [35]. Основные опасности тиосульфатного метода связаны с присутствием в рабочем растворе аммиака и меди: аммиак токсичен для рыб и способствует эвтрофикации водоёмов, а ионы Cu^{2+}

тоже ядовиты для водной среды. Поэтому сточные воды после тиосульфатного выщелачивания требуют обработки (удаления Cu , нейтрализации аммония) перед сбросом. Общий экологический риск тиосульфата ощутимо ниже, чем у цианида, а по оценке специалистов – “низкий” при должной эксплуатации [10, 24].

Тиомочевинный метод с точки зрения острой токсичности выгоднее цианида [36]: тиомочевина, или тиокарбамид, не вызывает мгновенной гибели при малых дозах (летальная доза порядка 8–14 г/кг для животных), то есть в тысячи раз менее токсична, чем цианиды. Однако у этого реагента имеются отсроченные вредные эффекты [37]. Тиомочевина признана подозреваемым канцерогеном (группа 2B IARC) – опыты показали развитие опухолей щитовидной железы у крыс при длительном воздействии вещества. У человека явной канцерогенности не выявлено, но обращаться с тиомочевинной следует как с потенциальным канцерогеном (в производстве она отнесена к токсичным веществам, требующим ограниченного контакта) [38, 39]. В рабочих зонах нужно предотвращать вдыхание аэрозоля тиомочевины и прямой контакт с кожей, применять средства защиты (респираторы, перчатки и т.д.). С точки зрения окружающей среды тиомочевина менее губительна при разовом выпуске, чем цианид (не убивает мгновенно всё живое), но может накапливаться и вредить экосистемам и людям при хроническом присутствии. В частности, слив даже разбавленных растворов тиомочевины строго запрещён – они подлежат сбору и специальной утилизации как опасные отходы [39]. Попадание тиомочевины в водоёмы может нарушать размножение и рост организмов, а продукты её разложения (тиолы, сероводород, аммиак) также нежелательны [40]. Данный метод требует тщательной изоляции и очистки отходов, хотя непосредственная угроза жизни при авариях ниже, чем у цианида.

Хлоридное (хлорное) выщелачивание по характеру опасностей стоит особняком, так как использует крайне агрессивные реагенты [41]. Основной реагент – газообразный хлор (Cl_2) или его производные (гипохлорит $\text{NaOCl} + \text{кислота}$) – представляет высокую опасность для здоровья: хлор токсичен при вдыхании (вызывает отёк лёгких), а контакты с концентрированной соляной кислотой вызывают ожоги. В промышленной практике зафиксированы многочисленные случаи отравлений и взрывов, связанных с применением хлорсодержащих технологий, поэтому прямое хлорирование руд в настоящее время практически не используется [42, 43]. Вместо него исследуются более мягкие и контролируемые методы окисления, основанные на применении гипохлоритов, пероксидов и других безопасных источников активного хлора. Однако и при таких подходах экологический риск остаётся значительным: утечки хлорсодержащих газов способны вызвать гибель водных организмов и поражение дыхательных путей у человека, а попадание кислых растворов в окружающую среду приводит к кислотному загрязнению почв и водных экосистем.

Согласно Д. В. Гордееву с соавт. [44], исследуются более контролируемые варианты на базе гипохлоритов и пероксидов; однако, как подчёркивают А. Г. Секисов и соавт. [45] и М. И. Фазлуллин и соавт. [46], даже при таких подходах ключевой стратегией остаётся предотвращение выбросов: герметичные, коррозионно-стойкие реакторы, эффективная газо- и водоочистка и полная нейтрализация стоков. При соблюдении этих требований воздействие на окружающую среду может быть контролируемым, но суммарный риск по-прежнему сопоставим с цианидным, хотя и имеет иную природу (ожогово-токсическое действие хлора вместо ферментной блокировки при CN^-).

Эффективность извлечения золота

Все рассмотренные методы способны обеспечить высокую степень извлечения – порядка 85–95 % золота при оптимальных условиях; их показатели представлены на рис. 1. Цианидный метод остается популярным благодаря очень высокой эффективности: ещё в 1890-е годы разработчики добивались извлечения до 96 % золота из руды с помощью цианистого раствора [47, 48].

В современных условиях, по данным А. А. Самсалиева и С. С. Ларина [49], для легкообогащаемых руд типично достигается около 90 % при цианидном выщелачивании. Даже на упорных (сульфидных, углистых) рудах комбинированные схемы с включением стадий цианирования дают > 90 %: так, для месторождения Пакрут суммарное извлечение составило 92,2 % при добавлении флотации и довыщелачивания хвостов (Х.И. Холов и соавт. [50]). По результатам А.Г. Михайлова и соавт. [51], тиомочевина как растворитель золота не уступает цианиду по максимально достижимому извлечению: в лабораторных испытаниях получали > 90 % за 6–8 ч выщелачивания концентратов. В промышленной практике тиокарбамид применялся для руд, трудных для цианида (например, с высокой примесью сурьмы), и показал высокие выходы золота [52]. Тиосульфатный метод также способен вынимать золото не хуже цианида: так, в одном из испытаний на упорном сырье получили 87,8 % извлечения на тиосульфате против 87,3 % на цианиде [53, 54]. Компания Barrick сообщала, что на руднике Goldstrike переход на тиосульфат позволил извлекать золото из углистых руд, которые не поддавались цианиду, причём итоговые выходы сравнимы с цианидными [10, 55]. Хлорное выщелачивание в теории может дать даже более высокий процент, близкий к 100 %, так как хлор окисляет и растворяет золото полностью. В XIX веке хлорный метод конкурировал с цианидом [41, 44]. Современные исследования показывают, что при сочетании окислительного автоклавирования и хлоридного выщелачивания можно извлечь >95 % золота из упорного концентрата [56]. Например, при выщелачивании концентрата в 6 часов с 20 % HCl и большим расходом хлора достигнуто 97 % извлечения. Однако средние показатели хлорных методов на реальных рудах часто ниже из-за побочных реакций: часть реагента тратится на растворение других минералов. Без автоклавной подготовки и высокой дозы окислителя золото может извлекаться неполно (есть данные о 58 % за 46 часов на гипохлорите без оптимизации). Потенциал метода остаётся высоким.

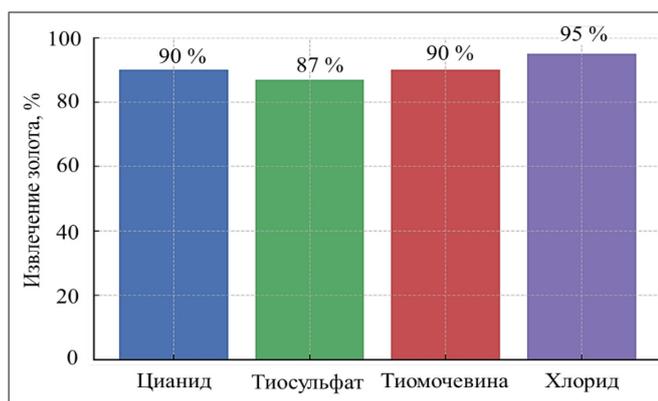


Рис. 1. Сравнение доли извлечённого золота при различных методах выщелачивания

Fig. 1. Comparison of the proportion of gold recovered using different leaching methods

Следует подчеркнуть, что, как показано у К. Янг [57] и Дж.Б. Мошер и соавт. [58], эффективность любого метода критично зависит от минералогии руды. Цианид хуже всего справляется с так называемыми упорными рудами, где золото мелко связано в сульфидах (пирит, арсенопирит) или в углистом веществе: такие руды требуют либо окислительного обжига или автоклава, либо альтернативных растворителей. Тиосульфат как раз эффективен для углистых руд – в них цианид “воруется” органическим углеродом (*preg-robbing* эффект), а тиосульфат нет [59]. В то же время тиосульфатная выщелачивающая система более чувствительна к присутствию растворённых ионов: повышенные концентрации некоторых металлов (например, Cu^{2+} , Zn^{2+}) катализируют разложение тиосульфата и могут снижать степень извлечения [19]. Тиомочевина лучше выносит наличие примесей As, Sb, Cu – они меньше мешают ей комплексовать золото. К тому же тиомочевина особенно быстра: она растворяет даже крупное золото намного скорее цианида, который славится медлительностью (стандартное цианирование длится 24 часа) [60]. В реальных схемах часто используют комбинации: гравитация + флотация с последующим цианированием либо цианирование с последующим выщелачиванием хвостов альтернативным реагентом (Ю. А. Мамаев и соавт. [61]; П. К. Федотов и соавт. [62]). В целом, по обзорам Х. И. Холова и соавт. [63] и В. А. Бочарова и соавт. [64], при оптимизации режимов любой из методов способен обеспечить 85–95 % извлечения; различия же проявляются преимущественно в скорости растворения, устойчивости к примесям и объёме требуемой предварительной подготовки руды.

Стоимость процесса и утилизация отходов

Затраты на применение того или иного метода зависят от стоимости реагентов, их необходимого количества, а также сложности технологической схемы [65, 66]. Цианидный метод традиционно считается наиболее экономичным для крупных производств. Главные причины – высокая эффективность (меньше потерь золота) и сравнительно невысокая цена самого реагента. По оценкам Н. А. Казаковой и соавт. [67] и С. С. Тимофеевой и соавт. [68], промышленный NaCN стоит порядка 2000–3000 \$/т, при этом типичный расход составляет 0,5–2 кг/т руды, что даёт всего «несколько долларов» реагентных затрат на тонну сырья. Технология цианирования хорошо отработана: применяются доступные материалы (например, сталь с резиновой футеровкой для чанов), а вспомогательные реагенты – известь, цементирующий цинк, активированный уголь – широко доступны по цене. Хотя капитальные вложения в золотоизвлекательные фабрики значительны, их величина, как отмечают А. О. Василькова и соавт. [69], слабо зависит от выбора растворителя; напротив, альтернативные схемы нередко требуют более сложного и дорогого оборудования. В итоге себестоимость извлечения при цианировании остаётся минимальной – пока не действуют дополнительные экологические сборы и ограничения.

Для сравнения, альтернативные методы могут потребовать большего количества реагентов или более дорогих компонентов. На рис. 2 приведён ориентировочный сравнительный расход основного реагента на 1 тонну руды для рассматриваемых методов.

Цианид потребляется в малом количестве (обычно 1 кг/т), тогда как тиосульфатные растворы требуют значительно больших доз – порядка десятков кг/т [18]. Тиомочевинное и хлоридное выщелачивание занимают промежуточное положение по расходу реагентов – их потребность обычно составляет лишь несколько килограммов на тонну руды [70, 71]. Повышенный рас-

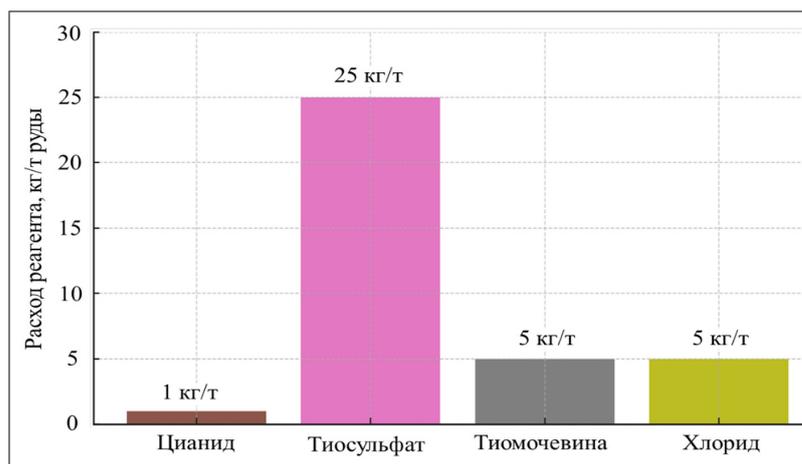


Рис. 2. Оценочный удельный расход ключевого реагента для разных методов

Fig. 2. Estimated specific consumption of the key reagent for different methods

ход тиосульфата связан с его частичным разложением в процессе выщелачивания – например, в опытах отмечают 25 кг/т руды расхода тиосульфата аммония [24,72], что увеличивает расходы на реагенты. В промышленной установке Barrick Goldstrike для удешевления процесса пришлось построить установку регенерации тиосульфата и его повторного использования [73, 74], иначе эксплуатационные затраты были бы слишком высоки. Тиомочевина является сравнительно недорогим реагентом (ориентировочная стоимость составляет около \$ 1000 за тонну, хотя в некоторых источниках упоминается цена порядка \$ 100 за тонну сырья [75]). Однако её удельный расход достаточно велик – обычно 5–10 кг на тонну руды, при этом дополнительно требуется около 5–10 кг серной кислоты (H_2SO_4) и не менее 1 кг ионов Fe^{3+} , вводимых в виде $Fe_2(SO_4)_3$, для окислительного растворения золота [76]. В результате суммарные реагентные затраты у тиомочевинного метода выше, чем у цианида, хотя и не астрономические. Хлорный метод по реагентам может быть сравнительно экономичен: технический хлор дешев, а при правильной технике его нужно 5 кг/т руды для полного извлечения золота (с учётом частичной регенерации хлора) [77]. Однако следует учитывать, что главная статья затрат при хлорировании – это материалы оборудования и безопасность. Необходимы кислотоупорные реакторы (дороже обычных), системы нейтрализации газов, дорогие сплавы или покрытия, что удорожает процесс. Кроме того, хлорный метод чаще реализуется при повышенных температурах и давлениях (например, совмещение с автоклавным окислением) [78], что требует дополнительной энергии.

С точки зрения утилизации отходов, по практическим оценкам Х.И. Холова и соавт. [10] и технологических регламентов, наименее затратной остаётся цианидная схема – вопреки токсичности CN^- . Технологии детоксикации хорошо отработаны и опираются на недорогие реагенты: процесс SO_2 /воздух (INCO) эффективно переводит цианид в менее опасные формы (тиоцианат, цианат) с использованием метабисульфита (источник SO_2) и медного катализатора [7]. Также применяются пероксид, гипохлорит и др.; подобные операции закладываются проектом фабрики. К 2008 г. в ЕС действовал норматив WAD-CN < 10 мг/л (10 ppm) в хвостохра-

нилище [10], которого достигают комбинацией поддержания pH, дозирования разрушителей и рециклинга воды. Благодаря дешёвым реагентам и тиражируемым схемам эксплуатационные расходы на детоксикацию обычно составляют «сенты» на тонну руды.

Для тиосульфатных хвостов требуется своя система очистки, но она также не слишком сложна. Основная задача – удалить из раствора ионы тяжелых металлов (медь, возможно, мышьяк, свинец, которые могли перейти в раствор) и нейтрализовать аммиак [19]. Это достигается осаждением гидроксидов при повышении pH и последующей фильтрацией осадка. Сам тиосульфат при длительном контакте с воздухом окисляется до сульфата, который уже не представляет опасности. Иногда применяют метод биологической очистки: бактерии денитрификаторы могут усваивать азот аммония, а сульфат-восстанавливающие – остатки серы [79]. Расходы на утилизацию тиосульфатных растворов оцениваются как умеренные и сопоставимы с обычной очисткой шахтных сточных вод [80]. Отсутствие дорогостоящих ядохимикатов упрощает обращение с отходами: например, нет строгих требований по хранению хвостов под слоем воды, как для цианида.

Тиомочевинные отходы – напротив, требуют повышенного внимания и затрат на обезвреживание [81]. Несмотря на отсутствие мгновенной токсичности, классификационно их относят к опасным отходам. Как указывалось, запрещено сбрасывать их без обработки. Утилизация включает несколько стадий: сначала деструкция тиомочевины в отходах – обычно окислителями (озон, гипохлорит, перманганат) в щелочной среде, что переводит тиокарбамид в менее токсичные вещества (например, в мочевины и сульфат). Параллельно или после проводят осаждение растворённых металлов (в том числе ценного золота, которое могло остаться в растворе). Осадок фильтруют, а очищенный раствор нейтрализуют [82]. Все эти операции – стандартные химводоочистные, но их себестоимость выше, чем у цианидной схемы, ввиду необходимости реагентов на окисление органики. Кроме того, приходится утилизировать большой объём твёрдых отходов (осадок серы, гипса, гидроксидов металлов) – их захоронение также требует расходов. Утилизация отходов тиомочевины добавляет заметную долю к расходам процесса, делая его экономически оправданным лишь при высоком содержании золота или в условиях, где цианид недопустим [83].

Для хлоридного метода наибольшие сложности – коррозия и минеральный состав стоков [41]. Сами реагенты (хлор, кислоты) в отходах не сохраняются при правильном ведении процесса – хлор полностью реагирует, а кислота нейтрализуется. Однако остаются очень солёные растворы (NaCl , CaCl_2) с растворёнными металлами [42]. Их нельзя просто сбросить в воду – высокая минерализация погубит экосистему. Обычно практикуют следующую схему: кислый раствор после выщелачивания отправляют в нейтрализацию известью, при этом металлы (Fe, Cu, Pb и др.) выпадают в осадок гидроксидов. Осадок отделяют и отправляют на хранение (как токсичный шлам). Остаётся солевой раствор, который либо повторно используют в технологическом процессе (идеально – замкнутый цикл хлоридов), либо подвергают дополнительной очистке. Возможна выпарка и кристаллизация соли с последующим складированием – это дорого, но уменьшает объём жидких отходов. Некоторые схемы предлагают переводить часть хлора в гипохлорит и возвращать в процесс. В любом случае система очистки при хлорном выщелачивании – это существенный дополнительный блок оборудования (нейтрализационные реакторы, фильтры, газоочистка), который увеличивает капитальные и операционные затраты

[43]. Без него эксплуатация метода невозможна по экологическим соображениям. По совокупности затрат на реагенты и утилизацию отходов хлоридный и тиомочевинный методы обычно уступают цианидному – это подтверждается тем фактом, что они внедряются лишь там, где использование цианида невозможно либо законодательными ограничениями, либо по технологическим причинам (неэффективность на данном сырье).

Заключение

Сопоставление четырёх гидрометаллургических подходов показывает, что универсального растворителя не существует: оптимальная технология определяется минералогией, требованиями к экологии и совокупной стоимостью владения процессом. При «простых» рудах экономически целесообразно цианирование при строгом контроле pH и последующей детоксикации WAD-CN (INCO, H₂O₂). Для углистых и preg-robbing систем рационален аммиачно-тиосульфатный режим с обязательной регенерацией тиосульфата и удалением NH⁴⁺ и Cu²⁺ из стоков. Для сурьмянистых и высокореакционных концентратов целесообразны тиомочевинные схемы с окислительной деструкцией органики. Хлоридные схемы остаются нишевыми: они требуют герметичных коррозионностойких аппаратов, газо- и водоочистки и замкнутого солевого контура. Во всех случаях повышается результативность комбинированных маршрутов (гравитация/флотация + выщелачивание), а также предварительного вскрытия сульфидной матрицы обжигом, био- или автоклавным окислением. Практическая рекомендация: начинать с минералого-технологического профилирования руды, сопоставлять чувствительность процесса к примесям (уход реагента, каталитическое разложение), затем выбирать растворитель с минимальным риском при требуемом извлечении и очистке стоков. Такой последовательный выбор снижает неопределённость проектных решений, уменьшает экологические риски и обеспечивает устойчивую металлургическую эффективность.

Список литературы / References

- [1] Звягинцев О.Е. *Аффинаж золота, серебра и металлов платиновой группы*. М., 1945, 244 с. [Zvyagintsev O.E. *Refining of Gold, Silver and Platinum Group Metals*. Moscow, 1945, 244 p. (in Russian)]
- [2] Быкова А.А. *Состояние и перспективы развития мирового рынка цветных металлов*. Б.: 2016, 72 с. [Bykova A.A. *State and Prospects for Development of the Global Non-Ferrous Metals Market*. Belgorod, 2016, 72 p. (in Russian)]
- [3] Украинцев В.Б., Мацура В.А., Украинцев И.В. О механизме растворения порошкообразных благородных металлов в цианидных растворах в аэробных и анаэробных условиях. *Журнал прикладной химии*, 2005, (78)10, 1585–1588 [Ukrainev V.B., Matsura V.A., Ukrainev I.V. On the Mechanism of Dissolution of Powdered Precious Metals in Cyanide Solutions under Aerobic and Anaerobic Conditions, *Russ. J. Appl. Chem.*, 2005, 78(10), 1585–1588 (in Russian)]
- [4] Бек Р.Ю., Зелинский А.Г., Овчинникова Н., Вайс А.А. Сравнительная характеристика каталитической активности адатомов таллия, свинца и висмута в реакции растворения золота в цианидных растворах. *Электрохимия*, 2004, 40(2), 148–154 [Bek R. Yu., Zelinsky A. G., Ovchinnikova S. N., Vais A. A. Comparative Catalytic Activity of Tl, Pb and Bi Adatoms in Gold Dissolution in Cyanide Solutions, *Electrochemistry*, 2004, 40(2), 148–154 (in Russian)]

[5] Рубцов Ю. И. Обоснование скоростного режима растворения металла в условиях системного подхода. *Вестник Забайкальского государственного университета*, 2019, 25, 7, 62–69 [Rubtsov Yu. I. Justification of the Rate Mode of Metal Dissolution under Systemic Approach, *Bulletin of the Transbaikal State University*, 2019, 25(7), 62–69 (in Russian)]

[6] Никитина Ю., Петров Г. В. Современное состояние и технологические перспективы применения малотоксичных растворителей золота для переработки техногенного сырья. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*, 2021, 19(1), 17–28 [Nikitina T. Yu., Petrov G. V. Current State and Technological Prospects for the Use of Low-Toxic Gold Solvents for Processing Technogenic Raw Materials, *Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2021, 19(1), 17–28 (in Russian)]

[7] Шарифбоев Н. Т. Сравнительные аспекты экологии и безопасности цианидного и тиосульфатного выщелачивания золота. *Вестник педагогического университета (Естественных наук)*, 2021, 1–2 (9–10), 274–281 [Sharifboev N. T. Comparative Aspects of Ecology and Safety of Cyanide and Thiosulfate Gold Leaching, *Bulletin of the Pedagogical University (Natural Sciences)*, 2021, 1–2 (9–10), 274–281 (in Russian)]

[8] Лукьянов Д. Е. Организация систем пожарной охраны на объектах золотодобычи методом тиосульфатного выщелачивания. *Вестник науки*, 2025, 1(82), 1074–1079 [Lukyanov D. E. Organization of Fire Protection Systems at Gold Mining Facilities Using Thiosulfate Leaching, *Science Bulletin*, 2025, 1(82), 1074–1079 (in Russian)]

[9] Пучков В. А. Катастрофы и устойчивое развитие в условиях глобализации. *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*, 2013, 3, 195–208 [Puchkov V. A. Catastrophes and Sustainable Development under Globalization, *Geoecology. Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology*, 2013, 3, 195–208 (in Russian)]

[10] Холов Х. И., Шарифбоев Н. Т., Самихов Ш. Р., Джуракулов Ш. Р., Зарифова М. Выщелачивание золота различными растворами, заменители цианида и их перспективы в будущем. *Журнал СВУ. Техника и технологии*, 2021, 14(4), 433–447 [Kholov K. I., Sharifboev N. T., Samikhov S. R., Dzhurakulov Sh. R., Zarifova M. S. Gold Leaching by Various Solutions, Alternatives to Cyanide and Their Future Prospects, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2021, 14(4), 433–447 (in Russian)].

[11] Лобанов В. Г., Хабибулина Р. Э., Колмачихина О. Б., Маковская О. Ю. Выбор выщелачивающей системы для извлечения золота из руды месторождения «Быньговское». *iPolytech Journal*, 2022, 4(165), 688–696 [Lobanov V. G., Khabibulina R. E., Kolmachikhina O. B., Makovskaya O. Yu. Selection of Leaching System for Gold Extraction from the Byngovskoye Deposit Ore, *iPolytech Journal*, 2022, 4(165), 688–696 (in Russian)]

[12] Хочиен М. К. Утилизация сернокислых растворов процесса активации серебросодержащего сырья. *Вода: химия и экология*, 2022, 4, 16–23 [Khochien M. K. Utilization of Sulfuric Acid Solutions of Silver-Bearing Raw Material Activation Process, *Water: Chemistry and Ecology*, 2022, 4, 16–23 (in Russian)]

[13] Занавескин Л. Н., Аверьянов В. А. Полихлорбифенилы: проблемы загрязнения окружающей среды и технологические методы обезвреживания. *Успехи химии*, 1998, 67(8), 788–800 [Zanaveskin L. N., Averyanov V. A. Polychlorobiphenyls: Environmental Pollution Problems and Technological Methods of Neutralization, *Russ. Chem. Rev.*, 1998, 67(8), 788–800 (in Russian)]

[14] Самсонов Н.Ю. Экономическая оценка эффективности переработки отвальных комплексов золоторудных месторождений. *Экономика региона*, 2010, 2, 139–146 [Samsonov N. Yu. Economic Assessment of the Efficiency of Processing Tailings Complexes of Gold Deposits, *Economy of Region*, 2010, 2, 139–146 (in Russian)]

[15] Евдокимов И., Евдокимов В. Повышение извлечения золота на основе совместной переработки руды и отходов. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, 2017, 2, 160–169 [Evdokimov S. I., Evdokimov V. S. Improving Gold Recovery Based on Joint Processing of Ore and Waste, *Journal of Mining Science*, 2017, 2, 160–169 (in Russian)]

[16] Кононова О.Н., Холмогоров А.Г., Кононов Ю. Сорбционное извлечение золота из растворов и пульп. *Химизм процесса, селективность, технология: монография*, М.; Красноярск: ИНФРА-М, СФУ, 2018, 197 с [Kononova O. N., Kholmogorov A. G., Kononov Yu. S. *Adsorptive Extraction of Gold from Solutions and Pulps: Chemism, Selectivity, Technology*, Moscow; Krasnoyarsk, INFRA-M, Siberian Federal University, 2018, 197 p. (in Russian)]

[17] Тусупова Б.Х., Байгурин Ж.Д. Анализ современного состояния добычи и кучного выщелачивания золота. *Вестник Казахского национального технического университета*, 2009, 5, 2 [Tusupova B. Kh., Baigurin Zh. D. Analysis of the Current State of Gold Mining and Heap Leaching, *Bulletin of Kazakh National Technical University*, 2009, 5, 2 (in Russian)]

[18] Козин Л.Ф., Мелехин В. Выщелачивание золота из руд и концентратов с использованием цианидов и альтернативных реагентов (обзор). *Журнал прикладной химии*, 2004, 77(10), 1585–1604 [Kozin L. F., Melekhin V. T. Leaching of Gold from Ores and Concentrates Using Cyanides and Alternative Reagents (Review), *Russ. J. Appl. Chem.*, 2004, 77(10), 1585–1604 (in Russian)]

[19] Холов Х.И., Шарифбоев Н.Т., Самихов Ш.Р., Джуракулов Ш.Р., Эшонов Ф. Химизм процесса растворения золота и серебра цианидом и тиосульфатом. *Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования*, 2024, 4(68), 134–139 [Kholov Kh. I., Sharifboev N. T., Samikhov Sh. R., Dzhurakulov Sh. R., Eshonova F. Chemism of the Process of Gold and Silver Dissolution by Cyanide and Thiosulfate, *Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research*, 2024, 4(68), 134–139 (in Russian)]

[20] Радомская В.И., Лосева О.В., Радомский М. Применение тиомочевины для концентрирования золота из вторичного сырья. *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*, 2004, 1, 80–86 [Radomskaya V. I., Loseva O. V., Radomsky S. M. Application of Thiourea for Gold Concentration from Secondary Raw Materials, *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2004, 1, 80–86 (in Russian)]

[21] Хабибулина Р.Э., Колмачихина Э.Б., Лобанов В.Г., Колмачихина О.Б. Изучение поведения дихлоризоцианурата натрия в водных растворах. *Известия вузов. Цветная металлургия*, 2025, 3, 74–84 [Khabibulina R. E., Kolmachikhina E. B., Lobanov V. G., Kolmachikhina O. B. Study of Sodium Dichloroisocyanurate Behaviour in Aqueous Solutions, *Izvestiya VUZov. Tsvetnaya Metallurgiya*, 2025, 3, 74–84 (in Russian)]

[22] Фурсов А.И., Янникова Ю.Ю. Результаты извлекаемости золота с использованием гипохлорита натрия из окисленных руд месторождения Глухое (Приморский край). *Недра Поволжья и Прикаспия*, 2025, 117, 37–46 [Fursov A. I., Yannikova Yu. Yu. Results of Gold Recovery Using Sodium Hypochlorite from Oxidized Ores of the Glukhoye Deposit (Primorsky Krai), *Subsurface of the Volga and Caspian Regions*, 2025, 117, 37–46 (in Russian)]

[23] Шумилова Л. В., Хатькова А. Н., Размахнин К. К., Простакишин М. Ф. Бесцианидная технология извлечения золота с применением методов интенсификации процесса выщелачивания. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, 2023, 10(1), 328–344 [Shumilova L. V., Khatkova A. N., Razmakhnin K. K., Prostakishin M. F. Non-cyanide Technology of Gold Extraction with Intensification Methods of Leaching Process, *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2023, 10(1), 328–344 (in Russian)]

[24] Холов Х. И., Шарифбоев Н. Т., Ганиев И. Н., Самихов Ш. Р., Джуракулов Ш. Р., Зарифова М. Тиосульфатное выщелачивание золота. *Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования*, 2021, 3(55), 58–63 [Kholov Kh.I., Sharifboev N. T., Ganiev I.N., Samikhov Sh.R., Dzhurakulov Sh.R., Zarifova M. S. Thiosulfate Leaching of Gold, *Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research*, 2021, 3(55), 58–63 (in Russian)]

[25] Есбулов Р. А., Мукажанова Ж. Б., Жарликов М. С., Зинченко А. М. Извлечение золота из золотосодержащих руд в процессе чанового выщелачивания при использовании заменителей цианида натрия. *Yessenov Science Journal*, 2025, 50(1), 239–246 [Yesbulov R. A., Mukazhanova Zh.B., Zharlikov M. S., Zinchenko A. M. Gold Extraction from Gold-Bearing Ores by Vat Leaching Using Sodium Cyanide Substitutes, *Yessenov Science Journal*, 2025, 50(1), 239–246 (in Russian)]

[26] Макарова М. Н., Макаров В. Г. Альтернативные методы оценки токсичности в рамках этической экспертизы. Обзор. *Лабораторные животные для научных исследований*, 2022, 1, 52–73 [Makarova M. N., Makarov V. G. Alternative Methods for Toxicity Assessment within Ethical Expertise. Review, *Laboratory Animals for Scientific Research*, 2022, 1, 52–73 (in Russian)]

[27] Размахнин К. К., Василюк П. А. Технологические особенности кучного выщелачивания золотосодержащих руд «Дельмачикского» месторождения. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*, 2020, 7(1), 234–238 [Razmakhnin K. K., Vasilyuk P. A. Technological and Ecological Features of Heap Leaching of Gold-Bearing Ores from the Delmachik Deposit, *Fundamental and Applied Problems of Mining Sciences*, 2020, 7(1), 234–238 (in Russian)]

[28] Воробьев-Десятковский Н. В. Упорные руды: признаки, причины упорности и способы ее преодоления. *Золото и технологии*, 2018, 22–40 [Vorobyev-Desyatovsky N. V. Refractory Ores: Signs, Causes of Refractoriness and Ways to Overcome It, *Gold and Technologies*, 2018, 22–40 (in Russian)]

[29] Тимофеева С., Бобоев А. А., Дроздова И. В. Профессиональные риски персонала золотоизвлекательной фабрики в Узбекистане. *Journal of Advances in Engineering Technology*, 2021, 1, 3–9 [Timofeeva S. S., Boboev A. A., Drozdova I. V. Occupational Risks of Personnel at the Gold Extraction Plant in Uzbekistan, *Journal of Advances in Engineering Technology*, 2021, 1, 3–9 (in Russian)]

[30] Воробьев А. Е., Янкевский А. В., Кулибали М., Кулибали Ю. В., Жалика К. Г. Экологические проблемы в Гвинейской Республике. *Вестник евразийской науки*, 2016, 2(33), 28 [Vorobyev A. E., Yankeuski A. V., Kulibali M., Kulibali Yu.V., Zhalika K. G. Environmental Problems in the Republic of Guinea, *Eurasian Science Bulletin*, 2016, 2(33), 28 (in Russian)]

[31] Тимофеева С., Дроздова И. В. Профессиональные риски золотоизвлекательных фабрик Бодайбинского района. *Безопасность-2021: материалы конференции*, 2021, 6–11 [Timofeeva S. S., Drozdova I. V. Occupational Risks of Gold Extraction Plants in the Bodaibo District, *Safety-2021: Conference Proceedings*, 2021, 6–11 (in Russian)]

[32] Хочиен М. К. Исследования тиоцианатного выщелачивания серебра из техногенного сырья. *Вестник Педагогического университета. Естественные науки*, 2022, 4(16), 184–189 [Khochien M. K. Studies on Thiocyanate Leaching of Silver from Technogenic Raw Materials, *Bulletin of the Pedagogical University. Natural Sciences*, 2022, 4(16), 184–189 (in Russian)]

[33] Biketova L. V., Lisakov I. N., Ershov S. D. Development of the Optimal Wastewater Treatment Technologies Refining of Precious Metals. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2016, 9(5), 703.

[34] Воробьев А. Е., Каргинов К. Г., Щелкин А. А., Чекушина В., Чекушина Е. В. Кинетика процесса тиосульфатного выщелачивания и пути его интенсификации. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, 2002, 12, 127–132 [Vorobyev A. E., Karginov K. G., Shchelkin A. A., Chekushina T. V., Chekushina E. V. Kinetics of the Thiosulfate Leaching Process and Ways to Intensify It, *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2002, 12, 127–132 (in Russian)]

[35] Гудков А. Факторы, влияющие на растворение Au и Ag из кеков автоклавного вскрытия нецианистыми растворителями на основе серы. *iPolytech Journal*, 2010, 4(44), 131–134 [Gudkov A. S. Factors Affecting the Dissolution of Au and Ag from Autoclave Residues by Non-Cyanide Sulfur-Based Solvents, *iPolytech Journal*, 2010, 4(44), 131–134 (in Russian)]

[36] Шипнигов А. А., Епифоров А. В., Собенников Р. М. Тиоцианат как наиболее перспективный заменитель цианида в металлургии золота. *К 300-летию Российской академии наук: сб. науч. тр.*, 2023, 2, 386 [Shipnigov A. A., Epiforov A. V., Sobennikov R. M. Thiocyanate as the Most Promising Cyanide Substitute in Gold Metallurgy, *To the 300th Anniversary of the Russian Academy of Sciences: Collected Papers*, 2023, 2, 386 (in Russian)]

[37] Lacoste-Bouchet P., Deschênes G., Ghali E. Thiourea Leaching of a Copper-Gold Ore Using Statistic Design. *Hydrometallurgy*, 1998, 47, 189–203.

[38] Радомская В. И., Радомский М., Павлова Л. М. Условия применения технологий тиокарбамидного выщелачивания золота и серебра. *Георесурсы*, 2013, 5(55), 22–27 [Radomskaaya V. I., Radomsky S. M., Pavlova L. M. Conditions for Application of Thiourea Leaching Technologies for Gold and Silver, *Georesources*, 2013, 5(55), 22–27 (in Russian)]

[39] Шумилова Л. В., Хатькова А. Н., Размахнин К. К. Исследование процессов окисления углеродсодержащих соединений и извлечения золота из упорного минерального сырья. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, 2023, 11, 143–158 [Shumilova L. V., Khatkova A. N., Razmakhnin K. K. Study of Oxidation Processes of Carbon-Containing Compounds and Gold Extraction from Refractory Mineral Raw Materials, *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2023, No. 11, 143–158 (in Russian)]

[40] Каковский И. А. Теоретические исследования в области гидрометаллургии благородных металлов. *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*, 1979, 3, 45–55 [Kakovsky I. A. Theoretical Studies in Hydrometallurgy of Precious Metals, *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Non-Ferrous Metallurgy*, 1979, 3, 45–55 (in Russian)]

[41] Медяник Н. Л., Чурляева Н. А., Варламова И. А., Калугина Н. Л. Хлоридно-нитратное экстрагирование металлов из отходов обогащения полиметаллических руд. *Современные тенденции развития науки и технологий*, 2015, 4(1), 106–110 [Medyanik N. L., Churlyayeva N. A., Varlamova I. A., Kalugina N. L. Chloride-Nitrate Extraction of Metals from Polymetallic Ore

Concentration Wastes, *Modern Trends in the Development of Science and Technology*, 2015, (4)1, 106–110 (in Russian)]

[42] Маковская О. Ю., Брянцева Н. И. Выщелачивание цветных металлов из шламов гальванического производства. *Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы конференции*, 2020, 227–230 [Makovskaya O. Yu., Bryantseva N. I. Leaching of Nonferrous Metals from Galvanic Sludge, *Scientific Basis and Practice of Ore and Technogenic Raw Material Processing: Conference Proceedings*, 2020, 227–230 (in Russian)]

[43] Фазлуллин М. И., Гуров В. А., Авдонин Г. И., Смирнова Р. Н., Ступин В. И. Перспективы подземного скважинного выщелачивания золота в России. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, 2002, 4, 145–148 [Fazlullin M. I., Gurov V. A., Avdonin G. I., Smirnova R. N., Stupin V. I. Prospects for Underground Borehole Leaching of Gold in Russia, *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2002, No. 4, 145–148 (in Russian)]

[44] Гордеев Д. В., Петров Г. В., Никитина Ю. Применение двухстадийного сернокислого и хлоридного выщелачивания для переработки сульфидных полиметаллических концентратов. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*, 2022, 20(3), 13–25 [Gordeev D. V., Petrov G. V., Nikitina T. Yu. Application of Two-Stage Sulfuric and Chloride Leaching for Processing Sulfide Polymetallic Concentrates, *Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2022, 20(3), 13–25 (in Russian)]

[45] Секисов А. Г., Конарева Г., Лавров А. Ю. Использование перкарбонатных соединений в составе цианидных реагентных комплексов при выщелачивании сложноизвлекаемых форм золота из песков россыпей. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, 2021, 12, 159–168 [Sekisov A. G., Konareva T. G., Lavrov A. Yu. Use of Percarbonate Compounds in Cyanide Reagent Complexes for Leaching of Difficultly Extractable Forms of Gold from Placer Sands, *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2021, 12, 159–168 (in Russian)]

[46] Фазлуллин М. И., Гуров В. А., Смирнова Р. Н. Кучное сернокислотно-хлоридное выщелачивание благородных металлов из руд и материалов. *Цветные металлы*, 1997, 8, 20 [Fazlullin M. I., Gurov V. A., Smirnova R. N. Heap Sulfuric-Chloride Leaching of Noble Metals from Ores and Materials, *Tsvetnye Metally*, 1997, 8, 20 (in Russian)]

[47] Стрижко Л. С., Бобоев И. Р. Способ извлечения золота из золотосодержащих продуктов, содержащих железо и медь. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 2012, 6(60), 66–69 [Strizhko L. S., Boboev I. R. Method of Gold Extraction from Gold-Bearing Products Containing Iron and Copper, *East-European Journal of Advanced Technologies*, 2012, 6(60), 66–69 (in Russian)]

[48] Залесов М. В., Григорьева В. А., Трубилов В. С., Бодуэн А. Я. Разработка технических решений для повышения эффективности переработки высокомедистой золотосодержащей руды. *Горная промышленность*, 2021, 5, 51–56 [Zalesov M. V., Grigorieva V. A., Trubilov V. S., Boduen A. Ya. Development of Technical Solutions to Improve Processing Efficiency of High-Copper Gold Ores, *Mining Industry*, 2021, 5, 51–56 (in Russian)]

[49] Самсалиев А. А., Ларин С. Обжиг сульфидных материалов в плазматроне со свободно плавающим плазматомом. *Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова*, 2010, 19, 92–97 [Samsaliev A. A., Larin S. S. Roasting of Sulfide Materials in a

Plasma Torch with a Freely Floating Plasmoid, *Izvestiya of Kyrgyz State Technical University Named after I. Razzakov*, 2010, 19, 92–97 (in Russian)]

[50] Холов Х. И., Ниёзов А. С., Джуракулов Ш. Р., Самихов Ш. Р. Минералого-геохимические особенности золотосодержащих руд месторождения Пакрут (Центральный Таджикистан) как основа гравитационного обогащения. *Вестник Забайкальского государственного университета*, 2024, 30(2), 82–92 [Kholov Kh.I., Niyozov A.S., Dzhurakulov Sh.R., Samikhov Sh.R. Mineralogical and Geochemical Features of Gold-Bearing Ores of the Pakrut Deposit (Central Tajikistan) as the Basis for Gravity Concentration, *Bulletin of Transbaikal State University*, 2024, 30(2), 82–92 (in Russian)]

[51] Михайлов А. Г., Харитоновна М. Ю., Вашлаев И. И., Свиридова М. Л. Выщелачивание золота и цветных металлов нецианистыми растворителями. *Успехи современного естествознания*, 2016, 7, 132–136 [Mikhailov A. G., Kharitonova M. Yu., Vashlaev I. I., Sviridova M. L. Leaching of Gold and Non-Ferrous Metals with Non-Cyanide Solvents, *Advances in Current Natural Sciences*, 2016, 7, 132–136 (in Russian)]

[52] Самихов Ш. Р., Зинченко З. А., Бобомуродов О. М. Изучение условий и разработка технологии тиомочевинного выщелачивания золота и серебра из руды месторождения Чоре. *Доклады Академии наук Республики Таджикистан*, 2013, 56(4), 318–324 [Samikhov Sh.R., Zinchenko Z. A., Bobomurodov O.M. Study of Conditions and Development of Thiourea Leaching Technology for Gold and Silver from the Chore Deposit Ore, *Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan*, 2013, 56(4), 318–324 (in Russian)]

[53] Холов Х. И., Шарифбоев Н. Т., Джуракулов Ш. Р., Самихов Ш. Р. Гидрометаллургическая обработка золотосодержащих руд месторождения «Истиклол» (Тутли). *Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования*, 2025, 1(69), 25–32 [Kholov Kh.I., Sharifboev N. T., Dzhurakulov Sh.R., Samikhov Sh.R. Hydrometallurgical Processing of Gold-Bearing Ores of the “Istiklol” (Tutli) Deposit, *Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research*, 2025, 1(69), 25–32 (in Russian)]

[54] Радомский М., Радомская В. И. Особенности тиокарбамидного выщелачивания золота и серебра. *Геология, история формирования и минерагения осадочных бассейнов, стратиграфия: материалы конференции*, 2012, 233 [Radomsky S. M., Radomskaaya V. I. Features of Thiourea Leaching of Gold and Silver, *Geology, Formation History and Minerageny of Sedimentary Basins, Stratigraphy: Conference Proceedings*, 2012, 233 (in Russian)]

[55] Самсонов Н. Ю., Дудкин Н. В. Золотодобыча в России: куда движемся?. *Всероссийский экономический журнал «ЭКО»*, 2013, 11(473), 159–175 [Samsonov N. Yu., Dudkin N. V. Gold Mining in Russia: Where Are We Going?, *All-Russian Economic Journal “ECO”*, 2013, 11(473), 159–175 (in Russian)]

[56] Иванников И., Эпов Д. Г., Крысенко Г. Ф., Медков М. А., Братская Ю., Юдаков А. А. Комплексный подход к извлечению золота из техногенных объектов золотодобычи Дальнего Востока России. *Вестник Отделения наук о Земле Российской академии наук (Вестн. ОНЗ РАН)*, 2013, 5(1001) [Ivannikov S. I., Epov D. G., Krysenko G. F., Medkov M. A., Bratskaya S. Yu., Yudakov A. A. Comprehensive Approach to Gold Extraction from Technogenic Objects of the Russian Far East, *Bulletin of Earth Sciences Department, Russian Academy of Sciences (Vestn. ONZ RAN)*, 2013, 5(1001) (in Russian)]

- [57] Young C. Cyanide: just the facts. *Cyanide: Social, Industrial and Economic Aspects*. Proceedings of the 2001 TMS Annual Meeting, 2001, 97–113.
- [58] Mosher J. B., Figueroa L. Biological Oxidation of Cyanide: A Viable Treatment Option for the Minerals Processing Industry?. *Minerals Engineering*, 1996, 9(5), 573–581.
- [59] Юсубов Р. Н., Эфендиев Ч. Д., Ахмедов М. М., Салимова Р. Исследование состава золотосодержащей руды Човдарского месторождения и выбор растворителя золота. *Химическая промышленность сегодня*, 2006, 9, 6–8 [Yusubov R. N., Efendiev Ch. D., Akhmedov M. M., Salimova S. R. Study of the Composition of Gold-Bearing Ore of the Chovdar Deposit and Selection of Gold Solvent, *Chemical Industry Today*, 2006, 9, 6–8 (in Russian)]
- [60] Пласкин И. Н., Кожухова М. Растворимость золота и серебра в тиомочевине. *Доклады АН СССР*, 1941, 31, 671–674 [Plaskin I. N., Kozhukhova M. Solubility of Gold and Silver in Thiourea, *Doklady of the Academy of Sciences of the USSR*, 1941, 31, 671–674 (in Russian)]
- [61] Мамаев Ю. А., Александрова Н., Литвинова Н. М. К вопросу извлечения золота из упорных руд. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, 2009, 2, 102–109 [Mamaev Yu. A., Aleksandrova T. N., Litvinova N. M. On the Issue of Gold Extraction from Refractory Ores, *Journal of Mining Science*, 2009, 2, 102–109 (in Russian)]
- [62] Федотов П. К., Сенченко А. Е., Федотов К. В., Бурдонов А. Е. Исследования обогатимости сульфидных и окисленных руд золоторудных месторождений Алданского щита. *Записки Горного института*, 2020, 242, 218–227 [Fedotov P. K., Senchenko A. E., Fedotov K. V., Burdonov A. E. Studies on Beneficiability of Sulfide and Oxidized Ores of Gold Deposits of the Aldan Shield, *Journal of Mining Institute*, 2020, 242, 218–227 (in Russian)]
- [63] Холов Х. И., Самихов Ш. Р., Курбонов Ш. А. Особенности геологии и технологии обогащения золото-сурьмяно-ртутных руд Джижикрутского месторождения. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, 2025, 168(2), 175–187 [Kholov Kh. I., Samikhov Sh. R., Kurbonov Sh. A. Features of Geology and Beneficiation Technology of Gold-Antimony-Mercury Ores of the Dzhizhikrut Deposit, *Bulletin of Kuzbass State Technical University*, 2025, 168(2), 175–187 (in Russian)]
- [64] Бочаров В. А., Игнаткина В. А., Чантурия Е., Юшина И., Хачатрян Л. С., Дунаева В. Н. О выборе возможных способов комплексного использования техногенных пиритных хвостов в связи с их переработкой. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, 2015, 10, 92–99 [Bocharov V. A., Ignatkina V. A., Chanturiya E., Yushina T. I., Khachatryan L. S., Dunaeva V. N. On the Selection of Possible Methods for Complex Utilization of Technogenic Pyrite Tailings in Relation to Their Processing, *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2015, 10, 92–99 (in Russian)]
- [65] Сомкин И. А. Методы учета затрат и калькулирования себестоимости продукции, оптимизация внутреннего контроля на предприятии на основе выбора эффективных методов. *Достижения и перспективы развития науки: сборник научных статей*, Уфа: А Терна, 2016, 26, 79 [Somkin I. A. Methods of Cost Accounting and Product Cost Calculation, Optimization of Internal Control at the Enterprise Based on the Choice of Effective Methods, *Achievements and Prospects for Science Development: Collection of Scientific Articles*, Ufa, A Terna, 2016, 26, 79 (in Russian)]
- [66] Кулякина Е. Л. Особенности применения различных методов учета затрат на производство в организациях химической промышленности. *Научный вестник: финансы, банки, ин-*

вестнику, 2017, 3(40), 140–144 [Kulyakina E. L. Features of Application of Various Cost Accounting Methods in Chemical Industry Organizations, *Scientific Bulletin: Finance, Banks, Investments*, 2017, 3(40), 140–144 (in Russian)]

[67] Казакова Н. А., Лещинская А. Ф., Пономарева А. И., Илатовский А. Е., Афанасиади К. Г. Прогноз и оценка факторов развития мировых рынков кобальта. *Экономика промышленности (Russian Journal of Industrial Economics)*, 2017, 10(2), 179–185 [Kazakova N. A., Leshchinskaya A. F., Ponomareva A. I., Ilatovsky A. E., Afanasiadi K. G. Forecast and Assessment of the Development Factors of the Global Cobalt Market, *Industrial Economics*, 2017, 10(2), 179–185 (in Russian)]

[68] Тимофеева С., Тимофеев С., Беспалова В. З. Условия труда на золотоизвлекательных фабриках и инновационные способы их улучшения. *iPolytech Journal*, 2014, 9(92), 100–108 [Timofeeva S. S., Timofeev S. S., Bepalova V. Z. Working Conditions at Gold Extraction Plants and Innovative Ways to Improve Them, *iPolytech Journal*, 2014, 9(92), 100–108 (in Russian)]

[69] Василькова А. О., Васильков Н. В., Хмельницкая О. Д., Войлошников Г. И. Анализ современного состояния способов переработки техногенного золотосодержащего сырья. *iPolytech Journal*, 2021, 1(156), 97–107 [Vasilkova A. O., Vasilkov N. V., Khmel'nitskaya O. D., Voyloshnikov G. I. Analysis of the Current State of Gold-Containing Technogenic Raw Material Processing Methods, *iPolytech Journal*, 2021, 1(156), 97–107 (in Russian)]

[70] Juarez C. M., Dutra A. J. B. Gold Electrowinning from Thiourea Solutions. *Minerals Engineering*, 2000, 13(10–11), 1083–1096.

[71] Джунушалиева Ш., Борбиева Д. Б., Сыдыкова Ш. Извлечение золота из упорных золотомышьяковых руд месторождения Иштамберды (КР) тиокарбамидным методом. *Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова*, 2012, 26, 237–242 [Dzhunushaliev T. Sh., Borbieva D. B., Sydykova Sh. S. Gold Extraction from Refractory Arsenopyrite Ores of the Ishtamberdy Deposit (Kyrgyz Republic) by Thiocarbamide Method, *Izvestiya of Kyrgyz State Technical University Named after I. Razzakov*, 2012, 26, 237–242 (in Russian)]

[72] Fraser K. S., Walton R. H., Wells J. A. Processing of Refractory Gold Ores. *Minerals Engineering*, 1991, 4(7–11), 1029–1041.

[73] Surimbayev B., Akcil A., Bolotova L., Shalgymbayev S., Baikonurova A. Processing of Refractory Gold-Bearing Sulfide Concentrates: A Review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2024, 45(6), 573–591.

[74] Borda J., Torres R. Prospects for Thiourea as a Leaching Agent in Colombian Gold Small-Scale Mining: A Comprehensive Review. *Journal of Sustainable Mining*, 2022, 21, 1–12.

[75] Xu B., Kong W., Li Q., Yang Y., Jiang T., Liu X. A Review of Thiosulfate Leaching of Gold: Focus on Thiosulfate Consumption and Gold Recovery from Pregnant Solution. *Metals*, 2017, 7(6), 222.

[76] Xing Z., Cheng G., Yang H., Xue X., Jiang P. Mechanism and Application of the Ore with Chlorination Treatment: A Review. *Minerals Engineering*, 2020, 154, 106404.

[77] Ge J., Xiao Y., Kuang J., Liu X. Research Progress of Chlorination Roasting of Heavy Metals in Solid Waste. *Surfaces and Interfaces*, 2022, 29, 101744.

[78] Navarro P., Vargas C., Villarroel A., Alguacil F. J. On the Use of Ammoniacal/Ammonium Thiosulfate for Gold Extraction from a Concentrate. *Hydrometallurgy*, 2002, 65(1), 37–42.

[79] Zhang X.M., Senanayake G. A Review of Ammoniacal Thiosulfate Leaching of Gold: An Update Useful for Further Research in Non-Cyanide Gold Lixiviants. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2016, 37(6), 385–411.

[80] Ray D.A., Baniyadi M., Graves J.E., Greenwood A., Farnaud S. Thiourea Leaching: An Update on a Sustainable Approach for Gold Recovery from E-Waste. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2022, 8(2), 597–612.

[81] Li H., Pan Y., Wu F., Zhou Y., Pan J. Turning Waste into Wealth: Efficient and Rapid Capture of Gold from Electronic Waste with a Thiourea Functionalised Magnetic Core Stirring Rod Adsorbent and Its Application for Heterogeneous Catalysis. *Green Chemistry*, 2022, 24(19), 7592–7601.

[82] Kuyucak N., Akcil A. Cyanide and Removal Options from Effluents in Gold Mining and Metallurgical Processes. *Minerals Engineering*, 2013, 50, 13–29.

[83] Evdokimov S.I., Evdokimov V.S. Improving Gold Recovery Based on Joint Processing of Ore and Waste. *Journal of Mining Science*, 2017, 2, 160–169.

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

EDN: AUWYKF

УДК 546.831.4

**Sintesis Precipitates and Films of Zirconium Dioxide
from a Urotripine System**

Stanislav S. Tulenin*, **Sofia K. Shvarts**,
Anastasia A. Andreeva, **Olga M. Izotova**,
Ekaterina D. Bocharova, **Natalia Yu. Igoshkina**
*Ural Federal University
Yekaterinburg, Russian Federation*

Received 11.06.2025, received in revised form 11.01.2026, accepted 28.01.2026

Abstract. This article presents the results of a study on the sol-gel synthesis of zirconium dioxide (ZrO_2) films and precipitates from the urotripine system. The focus is on optimizing the precipitation conditions, including the selection of precipitating agents (urotripine and urea), pH control of the medium, and the investigation of gelation kinetics. The findings are of practical significance for the development of technologies for producing thin-film materials based on ZrO_2 , which are used in catalysis, electronics, and protective coatings.

Keywords: zirconium dioxide, sol-gel method, thin films.

Citation: Tulenin S. S., Shvarts S. K., Andreeva A. A., Izotova O. M., Bocharova E. D., Igoshkina N. Yu. Sintesis Precipitates and Films of Zirconium Dioxide from a Urotripine System. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(2), 202–215. EDN: AUWYKF



Получение осадков и пленок диоксида циркония из уротропиновой системы

С. С. Туленин, С. К. Шварц, А. А. Андреева,
О. М. Изотова, Е. Д. Бочарова, Н. Ю. Игошкина

*Уральский федеральный университет
Российская Федерация, Екатеринбург*

Аннотация. В статье представлены результаты исследования золь-гель синтеза пленок и осадков диоксида циркония (ZrO_2) из уротропиновой системы. Основное внимание уделено оптимизации условий осаждения, включая подбор осадителей (уротропин и мочевины), контроль pH среды, а также изучению кинетики гелеобразования. Результаты работы имеют практическое значение для разработки технологий получения тонкопленочных материалов на основе ZrO_2 , применяемых в катализе, электронике и защитных покрытиях.

Ключевые слова: диоксид циркония, золь-гель метод, тонкие пленки.

Цитирование: Туленин С. С. Получение осадков и пленок диоксида циркония из уротропиновой системы / С. С. Туленин, С. К. Шварц, А. А. Андреева, О. М. Изотова, Е. Д. Бочарова, Н. Ю. Игошкина // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(2). С. 202–215. EDN: AUWYKF

Введение

Диоксид циркония (ZrO_2) перспективный керамический материал, обладающий высокой механической прочностью, термостойкостью, химической инертностью и биосовместимостью, благодаря чему широко используется в медицине для создания зубных имплантатов, а также в ортопедии для изготовления износостойких компонентов эндопротезов [1, 2]. Высокая температура плавления ($\sim 2700^\circ$) и термостойкость делают ZrO_2 незаменимым в производстве огнеупорных и термобарьерных материалов [3]. Не менее значимой является способность материала проводить ионы кислорода, что позволяет использовать ZrO_2 в твердооксидных топливных элементах (ТОТЭ, SOFC) и кислородных сенсорах. Кроме того, наночастицы диоксида циркония находят применение в катализе, композитных материалах и защитных покрытиях, улучшая их механические и функциональные характеристики [4, 5].

Соединение ZrO_2 характеризуется сложным полиморфизмом, который препятствует синтезу однофазных образцов, однако это же свойство предоставляет возможность получения различных материалов на основе ZrO_2 , существенно отличающихся по своим характеристикам. Наиболее распространенными полиморфными модификациями среди известных являются: кубическая ($Fm\bar{3}m$), тетрагональная ($P4_2/nmc$), орторомбические ($Pnma$, $Pca2_1$, $Pbca$), а также и моноклинная ($P2_1/c$) фазы, которые отличаются симметрией и параметрами кристаллической решетки [6, 7].

Наиболее распространенными способами получения диоксида циркония являются плазмохимический метод с контролируемым осаждением [17, 18], двухструйное осаждение из растворов [19] и соосаждение с последующим пиролизом [20]. Недостатками этих методов являются высокая энергозатратность и необходимость использования дорогостоящего оборудования, сложность контроля характеристик частиц и состава, а также низкая масштабируемость процесса. Недостатком плазмохимического метода также является риск загрязнения ионами плаз-

мы. Подобные недостатки затрудняют промышленное применение рассмотренных методов и увеличивают себестоимость продукции.

В свою очередь, золь-гель метод является низкотемпературным, позволяет контролировать размер и морфологию частиц, а также легко модифицировать состав продукта. Эти преимущества делают золь-гель метод удобным и экономически выгодным решением.

Поэтому целью работы стало исследование возможности осаждения, получение и исследование осадков и пленок диоксида циркония золь-гель методом.

Материалы и методы

При получении осадков и пленок ZrO_2 были использованы следующие реактивы: цирконил азотнокислый $ZrO(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$ (ч); мочевины CH_4N_2O (чда); уротропин (ГМТА) $C_6H_{12}N_4$ (ч). Осаждение из растворов с участием соли циркония (при концентрации от 0.05 до 0.1 М) и уротропина (0.12 М) при температуре 298 К. В качестве подложек для золь-гель осаждения были использованы следующие материалы: стекло предметное, монокристаллический кварц, монокристаллический кремний, ситалл марки СТ-50-1. Оценка склонности к гидролизу нитратов циркония была проведена с использованием методик расчета [10, 11, 16].

В качестве методов нанесения слоев были применены методы заливки, центрифугирования, окунания, синтез в объеме и наложением. Отбор проб для нанесения проводился на 11–26 минуте синтеза, в момент появления максимального количества зародышей твердой фазы и минимального значения светопропускания, с последующей термообработкой образцов в печи SNOL 30/1300 при 700, 900, 1300 °С в течение 1 часа.

С целью вычисления времени гелеобразования составов была определена зависимость коэффициента светопропускания T (%) от времени синтеза на спектрофотометре UNICO 2800 при длине волны 440 нм. Также для осадков диоксида циркония после термообработки был проведен рентгенофазовый анализ (РФА) на дифрактометре Rigaku D/MAX-2200VL в $CuK\alpha$ излучении в диапазоне 2θ от 10 до 90°. Для определения структуры частиц были использованы данные сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) JEOL JSM-5900 LV. Для осадков из уротропиновой системы был проведен термогравиметрический анализ (ТГА) на приборе Netzsch STA 449 F3 Jupiter в среде аргона до 1300°, скорость нагрева – 30 °С/мин. Размер частиц в осадках определяли на ультразвуковом анализаторе Analysette 22 MicroTec plus (ФТИ, УрФУ) при мощности излучателя 70 % от максимальной и затемнении луча 17 %.

Результаты и их обсуждение

На первом этапе работы был проведен расчет граничных условий образования гидроксида циркония с учетом констант нестойкости и произведения растворимости всевозможных комплексных соединений, образующихся в исследуемой системе. Согласно [8, 9] в водной среде образуются гидроксо соединения циркония с координационными числами от 1 до 4 (табл. 1).

Долевою концентрацию ионов циркония $\alpha_{Zr^{4+}}$ можно выразить уравнением (1)

$$\alpha_{Zr^{4+}} = \frac{1}{1 + \frac{[Zr(OH)^{3+}]}{K_{H1}} + \frac{[Zr(OH)_2^{2+}]^2}{K_{H2}} + \frac{[Zr(OH)_3^+]}{K_{H3}} + \frac{[Zr(OH)_4]^{4+}}{K_{H4}}}. \quad (1)$$

Долевая концентрация лиганда может быть найдена по уравнению (2)

$$\alpha_L = \frac{[L] \cdot \alpha_{Me}}{k_H}, \quad (2)$$

где α_L – долевая концентрация лиганда; $[L]$ – концентрация лиганда в растворе; α_{Me} – доля свободных ионов металла; k_H – константа нестойкости соединения.

Таблица 1. Константы нестойкости и произведения растворимости соединений циркония

Table 1. Constants of instability and solubility products of zirconium compounds

Соединение (комплексный ион)	ПП	рПП	р k_H	k_H
Zr(OH) $_3^+$	–	–	р k_{H1} = 14.32	$4.79 \cdot 10^{-15}$
Zr(OH) $_2^{2+}$	–	–	р k_{H2} = 28.26	$5.50 \cdot 10^{-29}$
Zr(OH) $_3^+$	–	–	р k_{H3} = 41.91	$1.23 \cdot 10^{-42}$
Zr(OH) $_4$	$1.10 \cdot 10^{-54}$	53.96	р k_{H4} = 55.27	$5.37 \cdot 10^{-56}$

Анализ диаграммы распределения концентрационных долей комплексов циркония (рис. 1) показал, что в сильноокислой среде присутствуют все известные комплексы циркония, а также свободные ионы циркония. Гидролиз соли циркония начинается в сильноокислой среде при рН = 0. Доля остальных ионов с увеличением рН стремительно снижается до 0 за исключением доли ионов [Zr(OH) $_3^+$], которая увеличивается до 0.28 при рН = 1 и затем резко снижается при рН = 3.

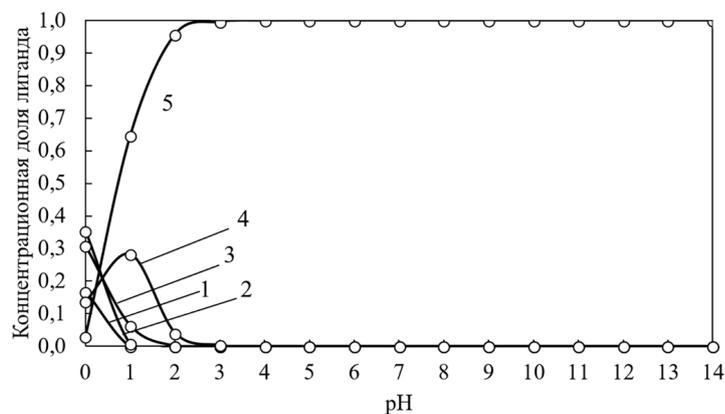


Рис. 1. Распределение концентрационных долей комплексов циркония в зависимости от рН. Линия 1 – долевая концентрация $\alpha_{Zr^{4+}}$; 2 – долевая концентрация ионов $\alpha_{Zr(OH)^{3+}}$; 3 – долевая концентрация ионов $\alpha_{Zr(OH)_2^{2+}}$; 4 – долевая концентрация ионов $\alpha_{Zr(OH)_3^+}$; 5 – долевая концентрация сольватированных молекул гидроксида $\alpha_{Zr(OH)_4}$

Fig. 1. Distribution of molar fractions of zirconium complexes as a function of pH. Line 1 – molar fraction $\alpha_{Zr^{4+}}$; 2 – molar fraction of ions $\alpha_{Zr(OH)^{3+}}$; 3 – molar fraction of ions $\alpha_{Zr(OH)_2^{2+}}$; 4 – molar fraction of ions $\alpha_{Zr(OH)_3^+}$; 5 – molar fraction of solvated hydroxide molecules $\alpha_{Zr(OH)_4}$

Общее уравнение для расчета граничных условий осаждения гидроксида металла будет иметь вид (3):

$$pC_n = pPP_{Me(OH)_n} - npK_w + npH - p\alpha_{Me^{n+}}, \quad (3)$$

где p – обозначение отрицательного десятичного логарифма; $PP_{Me(OH)_n}$ – произведение растворимости гидроксида металла; K_w – константа ионизации воды, $K_w = 10^{-14}$; pH – водородный показатель; $\alpha_{Me^{n+}}$ – долевая концентрация незакомплексованного иона металла.

Приведенная на рис. 2 графическая зависимости граничных условий образования гидроксида циркония показывает сложность формирования осадка в данной системе при 298 К при низких концентрациях исходных солей, однако анализ ионных равновесий (рис. 1) говорит об обратном. Так, в предварительных экспериментах на образование коллоидного гидроксида циркония указывает появление эффекта Тиндаля при просвечивании лазером толщи раствора.

Полученное несоответствие может быть объяснено сложностью ионных процессов, происходящих в системах, содержащих ионы редкоземельных металлов, формированием полиядерных комплексов для выбранных элементов, которые склонны к гидролизу [10–12, 14]. Результаты расчетов получены без учета повышенной температуры и кристаллизационного фактора, указывающего на наличие пересыщения в системе, что, в свою очередь, на 3–6 порядков понижает начальную концентрацию соли металла [10–14]. С учетом этого линии на графике окажутся выше оси абсцисс, что будет соответствовать реальной возможности осаждения гидроксида циркония при повышенной температуре. Однако, несмотря на приведенный выше расчет области образования гидроксида циркония с учетом термодинамических констант, метод химического осаждения из водных растворов оказался малоэффективен на практике. Сложность контроля процесса и получение обильных осадков гидроксида циркония не позволяет осаждать его тонкие слои на подложечном материале.

Иным методом получения гидроксида циркония может быть золь-гель метод с использованием достаточно простых систем, включающих слабые органические основания (осадители).

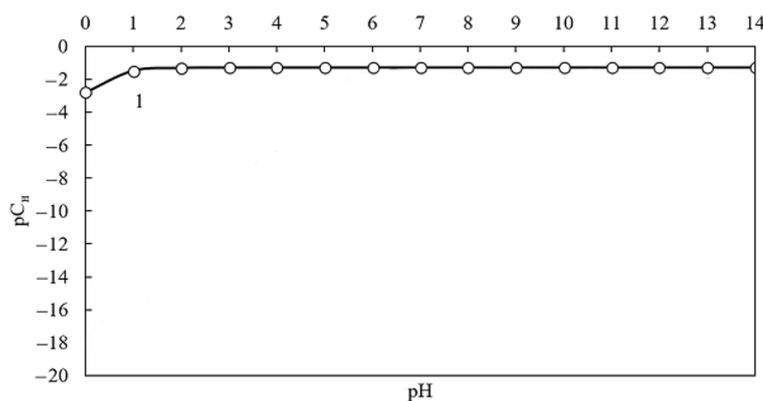


Рис. 2. Граничные условия образования гидроксидов $Zr(OH)_4$ от pH при температуре 298 К. 1 – граничные условия образования $Zr(OH)_4$

Fig. 2. Boundary conditions for the formation of $Zr(OH)_4$ as a function of pH at a temperature of 298 K. 1 – boundary conditions for the formation of $Zr(OH)_4$

Такие осадители должны удовлетворять определенным требованиям: хорошая растворимость в воде, безопасность при использовании, обеспечение полноты осаждения, отсутствие побочных реакций в растворе, приводящих к уменьшению его концентрации. Подходящими осадителями гидроксидов являются такие органические соединения, как мочевины, гексаметиленetetрамин (ГМТА), формамид (ФА) и диметилформамид (ДМФА) [12–14]. Данные соединения гидролизуются в водных растворах с образованием продуктов (аммиак, диметиламин и др.), которые, являясь слабыми основаниями, вызывают плавное изменение величины рН раствора и постепенное осаждение катионов металлов в виде гидроокиси. Согласно предварительным экспериментам наиболее интересными осадителями для гидроксида циркония можно считать уротропин и мочевины.

С целью определения склонности к гидролизу солей циркония были выполнены расчеты ионных равновесных в системе $Me^{n+} - H_2O - X$, где в качестве осадителя (X) использовался уротропин. При расчетах принималось, что на начальной стадии гидролиза солей циркония идет образование моноядерного гидроксокомплекса. Итоговое расчетное уравнение для системы $Me^{n+} - H_2O - X$ имеет вид:

$$pC_{Me} = p\alpha_{RH^+} + pC_R^0 - p\alpha_{Me(OH)^{(n-1)+}} + 2pH - pK_w \frac{[RH^+]}{[R][H^+]}, \quad (4)$$

где α – мольная доля металла и осадителя в растворе.

Используя уравнение (4), можно определить степень влияния применяемого осадителя на процесс образования твердой фазы гидроксида металла и сделать вывод о полноте его осаждения. На рис. 3 линия 1 разделяет плоскость графика на две части – на область ненасыщенного раствора (ниже линии) и область двухфазной системы «раствор-осадок» (выше линии). Так, при комнатной температуре синтеза и низких концентраций соли циркония можно работать в расчетной области рН вплоть до 12 (рис. 3). Для формирования гидроокиси циркония необходимо пересечение линии 3 снизу вверх, что обеспечивается плавным ростом рН.

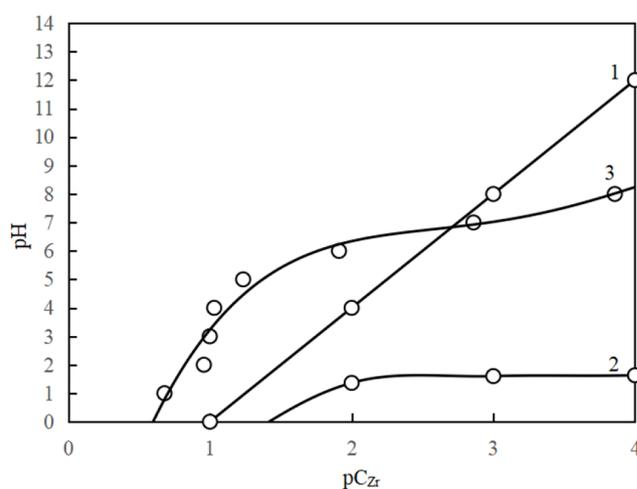


Рис. 3. Зависимость равновесных значений рН в системах $Zr^{4+}_{p-p} - Zr(OH)_{4oc}$ (1); $Zr^{4+} - GMTA - H_2O$ при $[GMTA]=0.1$ моль/л (2); равновесие $Zr^{4+} - ZrOH^{3+} - H_2O$ (3)

Fig. 3. Dependence of the equilibrium pH values in the systems $Zr^{4+}_{p-p} - Zr(OH)_{4oc}$ (1); $Zr^{4+} - GMTA - H_2O$ at $[GMTA]=0.1$ mol/l (2); equilibrium $Zr^{4+} - ZrOH^{3+} - H_2O$ (3)

Наличие в реакционной смеси уротропина будет способствовать преждевременному образованию гидроксокомплексов циркония в области pH от 0 до 7. Поэтому осаждение предпочтительно вести до pH=7 и при малых концентрациях соли металла в растворе менее 0.1 моль/л.

Стоит отметить, что предварительные эксперименты показали возможность получения гелей гидроксида циркония с уротропином при комнатной температуре лишь при pH исходной смеси около 4 (с мочевиной образование гелей возможно лишь при температурах выше 323 К). При этом выявлено определяющее влияние начального значения pH смеси и плавности его изменения на образование гидроксида циркония и продолжительность процесса гелеобразования. В зависимости от соотношения концентраций соль циркония/уротропин в пределах от 4 до 8.5 были получены плотные гели (рис. 4а). При увеличении концентрации соли циркония наблюдалось обильное образование гидроксида циркония и выпадение его в осадок. При малых концентрациях зародышеобразование либо не наблюдалось, либо было крайне замедленно во времени.

Начало образования первых зародышей гидроксида циркония, а затем и плотной структуры геля определяли по плавному спаданию кривой пропускания (рис. 5). При этом для системы с участием ГМТА (0.12 М) и соли циркония (0.1 М) при температуре 298 К наблюдается плавное увеличение pH от 3.95 до 4.5 за 25 ч (рис. 4б), что способствует равномерному образованию гидроксида циркония во всем объеме раствора.

Получение кристаллического диоксида циркония для дальнейшего практического применения возможно только при высокотемпературной термообработке полученных гелей или осадков. По данным РФА при температурах до 100 °С определяется промежуточная аморфная фаза гидроксида циркония с остатками органического осадителя. Кубическая модификация

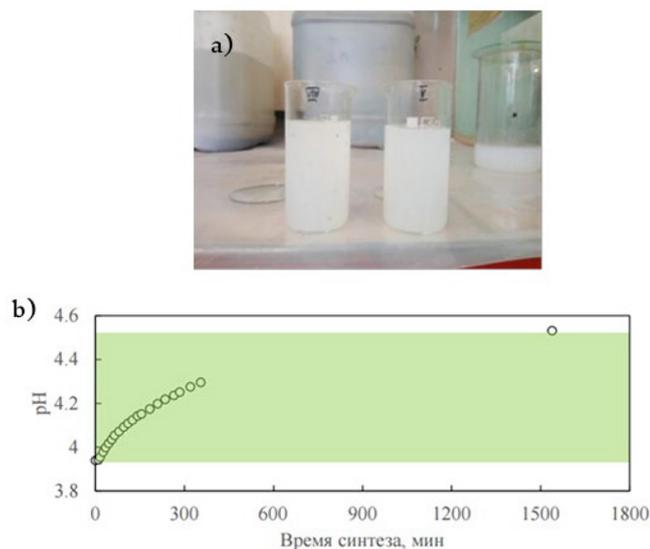


Рис. 4. а – образцы гелей гидроксида циркония ZrO_2 , полученных из уротропиновой системы; б – зависимость pH в системе с участием ГМТА от времени синтеза при 298 К

Fig. 4. а – samples of zirconium hydroxide ZrO_2 gels obtained from the urotropin system; б – dependence of the pH in the system with GMТА on the synthesis time at 298 К

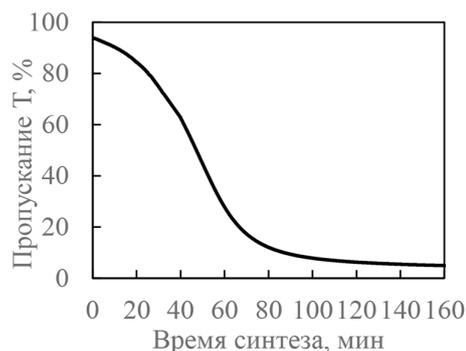


Рис. 5. Результаты спектрофотометрии (пропускание T) для раствора, содержащего 0.1 М соль циркония – 0.14 М ГМТА. Длина волны 440 нм

Fig. 5. Spectrophotometry results (transmittance T) for a solution containing 0.1 M zirconium salt – 0.14 M GMTA. Wave length 440 nm

ZrO₂ (с постоянными решетки $a = b = c = 5.12910 \text{ \AA}$) является основной фазой в результате термообработки при 400 °С. С увеличением температуры отжига до 700 °С в образцах обнаружена единственная фаза тетрагонального диоксида циркония с постоянными решетки $a = b = 3.6055(17) \text{ \AA}$ и $c = 5.213(4) \text{ \AA}$. Основной фазой термообработанного осадка при 900 °С является моноклинный бадделеит (собственно диоксид циркония), на долю которого приходится 84.5 мас.%, остальные 15.5 мас.% приходятся на остаточный тетрагональный диоксид цирконий (рис. 6). С увеличением температуры до 1300 °С в образцах присутствует только фаза моноклинного бадделеита.

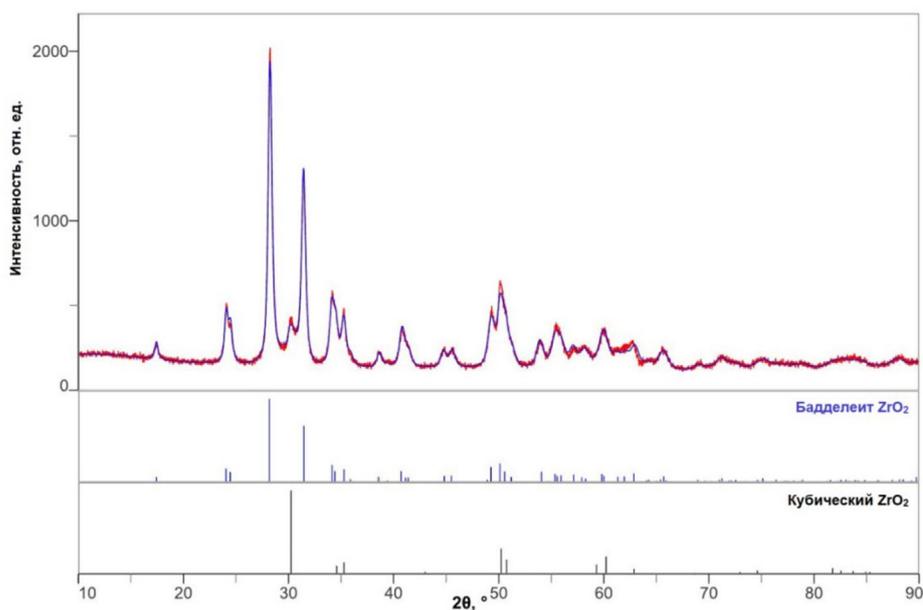


Рис. 6. РФА осадка, полученного из уротропиновой системы, после обработки при 900 °С

Fig. 6. XRD of the precipitate obtained from the urotropine system after treatment at 900 °С

В термообработанном при 900 °С осадке диоксида циркония наблюдается бимодальное распределение частиц с максимумом при 25 и 200 мкм – более 70 % частиц имеют размеры от 0.1 до 125 мкм и менее 30 % частиц имеют размеры от 100 до 500 мкм (рис. 7). Частицы без предварительного перемола достаточно крупные, чтобы их можно было использовать, например, для электрофоретического осаждения – приготовленные из таких порошков суспензии будут иметь низкую седиментационную устойчивость.

По данным СЭМ исходные химически осажденные порошки гидроксида циркония из уротропиновой системы состоят из частиц с размером от 3 до 30 мкм (рис. 8). После термообработки синтезированных образцов при 900 °С в них наблюдается наличие мелких и крупных частиц неправильной формы, основная масса которых приходится на 70–80 мкм, а средний

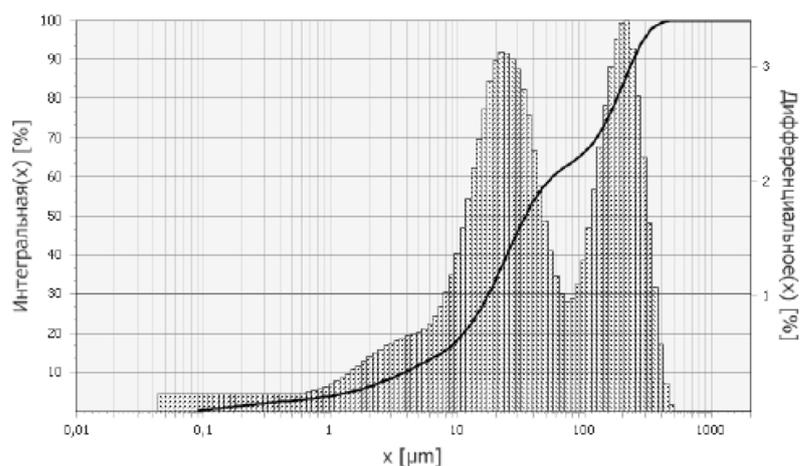


Рис. 7. Интегральное и дифференциальное распределение частиц по размерам в порошке оксида циркония после термообработки при 900 °

Fig. 7. Integral and differential particle size distribution in zirconia powder after thermal treatment at 900 °

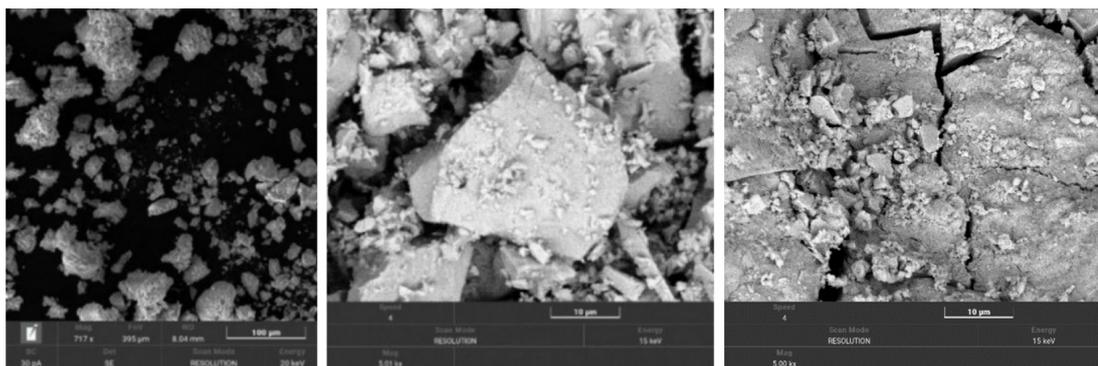


Рис. 8. Результат СЭМ порошка диоксида циркония, полученного из уротропиновой системы до и после отжига при 900 и 1300 °

Fig. 8. SEM result of zirconium dioxide powder obtained from the urotropin system before and after annealing at 900 and 1300 °

размер частиц составляет от 0.4 до 160 мкм. Морфология частиц практически не претерпевает изменений с увеличением температуры отжига – это, как правило, крупные неровные частицы с достаточно гладкой поверхностью и большим скоплением мелких частиц на них. Стоит отметить, что большинство крупных частиц имеет на поверхности глубокие трещины шириной более 1 мкм, число которых растет с увеличением температуры термообработки, что говорит о наличии внутренних напряжений. Увеличение температуры отжига приводит к растрескиванию частиц и уменьшению их линейного размера с 250 до 160 мкм.

Термогравиметрический анализ показал, что общая потеря массы составила 56.65 % от первоначальной. В интервале от 50 до 200 °С происходит удаление адсорбированной воды, а при 120–150 °С происходит термическое разложение остаточного уротропина. При повышении температуры до 300 °С гидроксидные группы переходят в кислородные мостики между ионами циркония (оксоляция), выделяется вода и образуется аморфный диоксид циркония [15]. Таким образом, более 40 % массы образца теряется до 400 °С (рис. 9).

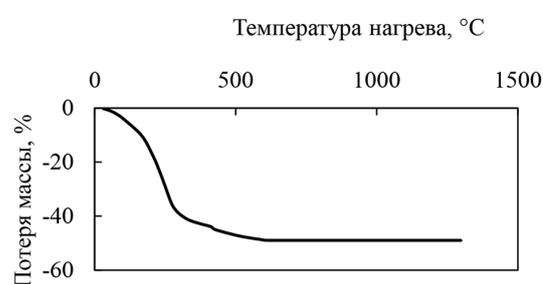


Рис. 9. Результат термогравиметрического анализа осадка, полученного из уротропиновой системы

Fig. 9. The result of thermogravimetric analysis of sediment obtained from the urotropin system

Наличие тепловых эффектов на термограмме указывает на различные фазовые превращения в образце. Так, возгонка уротропина наблюдается при 263 °С с разложением в газовой фазе, а потеря молекул уротропина из комплекса с цирконием будет происходить выше 270 °С, что характеризуется эндоэффектом. Дополнительная потеря молекул уротропина в структуре возможна и в области до 600 °С. При 380–430 °С происходит кристаллизация диоксида циркония в кубической структуре (экзоэффект на ДТА). Увеличение температуры до 630 °С приводит к необратимому переходу кубического диоксида циркония в тетрагональную модификацию, который идентифицирован по РФА при 700 °С. Фазовый переход из тетрагональной в моноклинную фазу и изменение формы частиц наблюдаются на участке от 600 до 1300 °С, что также подтверждается данными РФА.

В работе важным являлся подбор методики нанесения слоев в процессе золь-гель синтеза. На выбор метода сильное влияние оказывает используемый объем раствора, процесс сушки и старения геля. Центрифугирование без пленкообразующих веществ приводит к быстрому испарению водного растворителя в результате вращения и формированию островковых структур по краям подложки. Пленки имеют симметричную картину относительно центра вращения, но крайне неоднородны. Метод накатки является более эффективным ввиду получения равномерных слоев как до, так и после термообработки.

В процессе получения слоев важно контролировать объем нанесения раствора, скорость высыхания геля и качество материала основы. Результаты СЭМ полученных на ситалле после термообработки пленок диоксида циркония из уротропиновой системы показывают важность подбора условий нанесения (рис. 10). Полученные слои при большом увеличении имеют трещины шириной до нескольких сотен нанометров, что связано с быстрым высыханием и большим содержанием воды (растворителя) в образцах.

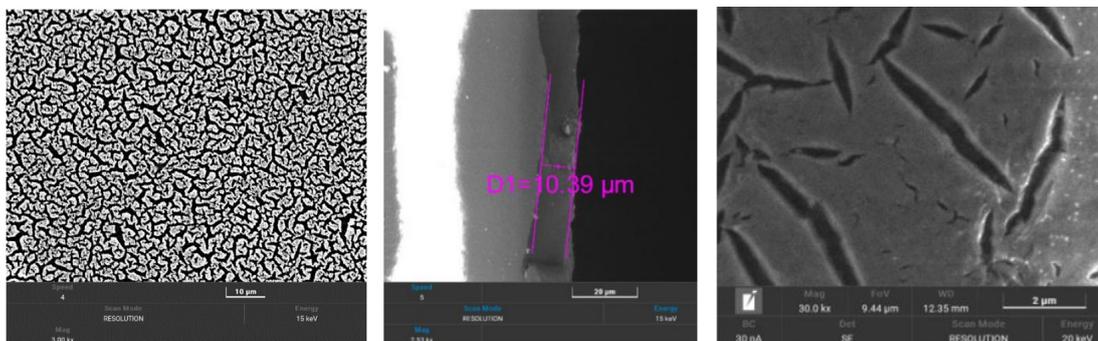


Рис. 10. СЭМ-изображения пленки диоксида циркония, полученного на ситалле, после термообработки при 900 ° и торцевого слома подложки с пленкой, полученные методом накатки и центрифугирования

Fig. 10. SEM images of a zirconium dioxide film obtained on a sitall after heat treatment at 900 °C and the end break of the substrate with the film obtained by knurling and centrifugation

Лучший результат показал метод накатки с последующей сушкой слоя и термообработкой. Однако ввиду того, что гели были получены на водной основе, пленка крайне неоднородна после термообработки. Слои имеют мозаичную структуру с большим количеством трещин. Толщина таких пленок составила 10.39 мкм.

Выводы

Расчеты граничных условий образования и ионных равновесий для свободных и закомплексованных форм циркония показали, что для данной системы характерно сложное ионное взаимодействие, также существенное влияние на процесс осаждения оказывает гидролиз соли циркония, который начинается в кислой среде при $\text{pH} = 0$. По результатам расчетов было установлено, что оптимальное начальное значение процесса осаждения гидроксида циркония возможно при $\text{pH} = 3$, а для процесса формирования геля и пленок на подложечном материале необходим плавный рост pH .

В результате проведенных исследований методом золь-гель были получены осадки и пленки гидроксида циркония из уротропиновой системы. В термообработанных образцах средний размер частиц составляет от 0.4 до 160 мкм, в синтезированных осадках размер частиц варьируется от 3 до 30 мкм. Основной фазой после термообработки при 900 °C по данным РФА является моноклинный ZrO_2 , на долю которой приходится 84.5 мас.%, остальные 15.5 мас.% приходятся на тетрагональный ZrO_2 . По данным РФА были идентифицированы фазовые переходы при температуре 630 °C (необратимый переход части кубического диоксида циркония

в тетрагональную), и на участке от 600 до 1300 °С фазовый переход тетрагональной в моноклинную фазы, происходящий с изменением формы частиц.

Среди методов нанесения слоев из водных растворов наилучший результат был продемонстрирован методом накатки с последующей сушкой и термообработкой. Полученные пленки имеют мозаичную структуру с большим количеством пустот, толщина пленок составила 10.39 мкм.

Полученные результаты имеют практическое значение для разработки технологий получения тонкопленочных материалов на основе ZrO_2 , которые могут быть применены в катализе, электронике и защитных покрытиях.

Список литературы / References

[1] Карпов К. А., Туленин С. С. Получение оксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия. Состав и морфология. *Журнал Издательство Уральского университета*, 2019. 56–56 [Karpov K. A., Tulenin S. S. Production of zirconium oxide stabilized with yttrium oxide. Composition and morphology. *Ural University Publishing House Journal*, 2019. 56–56 (in Russian)]

[2] Веляев Ю. О., Илюхина Е. М., Кометиани И. Б., Покинтелица Н. И., Графова А. Е. Получение аморфного ZrO_2 из азотнокислого цирконила и изучение его структурно-поверхностных свойств. *Журнал Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия*. 2020. Т. 6 (72). № 1. 251–261 [Velyaev Yu. O., Ilyukhina E. M., Cometyani I. B., Pokintelitsa N. I., Grafova A. E. Well. Obtaining amorphous ZrO_2 from nitric acid zirconyl and studying ego structurally-confidential urgent property. *Scientific Journal of the Crimean Federal University named after V. I. Vernadsky. Biology. Chemistry*. 2020. T. 6 (72). № 1. 251–261 (in Russian)]

[3] Joel Hemanth, Sara Sowjanya Steevenson. Corrosion and Wear Behavior of Nano-Zirconium (Zr) Coated Commercial Grade Cast Iron by Sol-Gel and Plasma Spray Process. *Open Journal of Composite Materials*, 2019. Vol. 9. № 2. 57–71

[4] Платенкин А. В., Чернышов В. Н., Шахнов В. А. Синтез наноразмерного диоксида циркония для создания портативных источников питания. *Журнал Проектирование и технология электронных средств*, 2017. Вып. 2. 3–10 [Platenkin A. V., Chernyshov V. N., Shakhnov V. A. Synthesis of nanoscale zirconium dioxide for the creation of portable power sources. *Journal of Design and Technology of Electronic Means*, 2017. Issue 2. 3–10 (in Russian)]

[5] Селеменова Д. Г., Кравцов А. А., Блинов А. В., Ясная М. А. Влияние температуры прокаливания на структурные изменения наноразмерного диоксида циркония. *Журнал Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*, 2015. Вып. 7. 450–455 [Selemenova D. G., Kravtsov A. A., Blinov A. V., Yasnaya M. A. Influence of heating temperature on structural changes of nanoscale zirconium dioxide. *Journal of Physico-Chemical Aspects of Studying Clusters, Nanostructures and Nanomaterials*, 2015. Issue 7. 450–455 (in Russian)]

[6] Горелов В. П., Беяков С. А., Абдурахимова Р. К. Фазовые переходы в моноклинном ZrO_2 . *Журнал Физика твердого тела*, 2023. Т. 65. № 3. 472–477 [Gorelov V. P., Belyakov S. A., Abdurakhimova R. K. Phase transitions in monoclinic ZrO_2 . *Journal of Solid State Physics*, 2023. Vol. 65. № 3. 472–477 (in Russian)]

[7] Kanimozhi Balakrishnan, Vasu Veerapandy, Vajeeston Nalini, Ponniah Vajeeston. Density functional theory analysis of novel ZrO_2 polymorphs: Unveiling structural stability, electronic structure, vibrational and optical properties. *Journal of Computational Materials Science*, 2025. № 246. 1–15

- [8] Лурье Ю. Ю. *Справочник по аналитической химии 4-е изд.*, перераб. и доп. М.: Химия, 1971. 456 [Lurie, Yu. Yu. *Handbook of Analytical Chemistry, 4th ed.*, reprint. and additional M.: "Chemistry": Moscow 1971. 456 (in Russian)]
- [9] Чиркст Д. Э. Термодинамические свойства гидроксосоединений и механизм ионной флотации церия, европия и иттрия /Д. Э. Чиркст. [и др.]. *Журнал физической химии*, 2009. Т. 83. № 12. 2221–2226 [Chirkst D. E. Thermodynamic properties of hydroxo compounds and the mechanism of ion flotation of cerium, europium and yttrium/D. E. Chirkst. [and others]. *Journal of Physical Chemistry*, 2009. Vol. 83. No. 12. 2221–2226 (in Russian)]
- [10] Миролюбов В. Р. Осаждение гидратированного оксида алюминия из щелочных растворов с использованием амидов карбоновых кислот. *Журнал неорганической химии*, 1983. Т. 28. № 2. 518–520 [Mirolyubov V. R. Precipitation of hydrated aluminum oxide from alkaline solutions using amides of carboxylic acids. *Journal of Non-Organic Chemistry*, 1983. Vol. 28. No. 2. 518–520 (in Russian)]
- [11] Миролюбов В. Р. Органические основания как осадители гидратированных оксидов металлов. Расчет равновесий в системе « $Me^{n+}-R - H_2O$ » /В. Р. Миролюбов. *Вестник УГТУ-УПИ, серия химическая*, 2003. 54–58 [Mirolyubov V. R. Organic bases as precipitators of hydrated metal oxides. Calculation of equilibria in the $Me^{n+}-R - H_2O$ system /V. R. Mirolyubov. *Bulletin of UGTU-UPI, chemical series*, 2003. 54–58 (in Russian)]
- [12] Ваганова Ю. В. Осаждение гидроксидов металлов с использованием слабых органических оснований / Ваганова Ю. В. [и др.]. *Вестник ЮУрГУ. Серия химия*, 2013. Т. 5. № 4. 16–23 [Vaganova Yu. V. Precipitation of metal hydroxides using weak organic bases/Yu. V. Vaganova. [and others]. *Bulletin of SUSU. Chemistry series*, 2013. Vol. 5. No. 4. 16–23 (in Russian)]
- [13] Новикова Ю. В. *Физико-химические закономерности получения осадков и пленок на основе оксида цинка с использованием слабых оснований*, дис. ... канд. хим. наук./Ю. В. Новикова. Екатеринбург, 2015, 173 [Novikova Yu. V. *Physico-chemical patterns of precipitation and films based on zinc oxide using weak bases*, dis. ... Candidate of Chemical Sciences/Yu. V. Novikova. Yekaterinburg, 2015, 173 (in Russian)]
- [14] Власова, К. Ю. Синтез твердых растворов $ZrO_2: Eu$ с использованием методов гомогенного осаждения /К. Ю. Власова [и др.]. *Доклады Академии Наук*, 2011. Т. 436. № 3. 339–342 [Vlasova, K. Y. Synthesis of solid solutions of $ZrO_2: Eu$ using methods of homogeneous deposition/K. Y. Vlasova [et al.]. *Reports of the Academy of Sciences*, 2011. Vol. 436. № 3. 339–342 (in Russian)]
- [15] Подзорова Л. И., Ильичева А. А., Михайлина Н. А. и др. Влияние условий синтеза золь-гель-методом порошков в системе $ZrO_2-CeO_2-Al_2O_3$ на их фазовый состав. *Неорган. материалы*, 2001. Т. 37. № 1. 60–66 [Podzorova L. I., Ilyicheva A. A., Mikhaylina N. A. and others. The effect of the conditions of synthesis by the sol-gel method of powders in the $ZrO_2-CeO_2-Al_2O_3$ system on their phase composition. *A non-organ. Materials*, 2001. Vol. 37. No. 1. 60–66 (in Russian)]
- [16] Маскаева Л. Н., Туленин С. С., Тимина А. А., Шемякина А. И., Марков В. Ф. Оценка условий образования и синтез тонких пленок сульфида олова(II) из растворов с использованием тиокарбамида и тиоацетамида. *Бутлеровские сообщения*, 2016. Т. 45. № 3. 72–79 [Maskaeva L. N., Tulenin S. S., Timina A. A., Shemyakina A. I., Markov V. F. Evaluation of the conditions of formation and synthesis of tin(II) sulfide thin films from solutions using thiocarbamide and thioacetamide. *Butlerov's Messages*, 2016. Vol. 45. No. 3. 72–79 (in Russian)]

[17] Алюков Е. С. *Плазмохимический синтез диоксида циркония из водно-органических нитратных растворов, магистерская диссертация*. Томск, 2019, 110 [Alyukova I. S. *Plasmochemical synthesis of zirconium dioxide from water-organic nitrate solutions*, Master's thesis. Tomsk, 2019, 110 (in Russian)]

[18] Домашенков М. А. Синтез порошков стабилизированного диоксида циркония с различным содержанием иттрия с помощью контролируемого осаждения, *Проблемы теоретической и экспериментальной химии: тезисы докладов XXXIII Российской молодежной научной конференции с международным участием, посвященной 100-летию со дня рождения профессора В. Ф. Барковского*. Екатеринбург, Издательство Уральского университета, 2023, 328 [Domashenkov M. A. Synthesis of stabilized zirconium dioxide powders with various yttrium contents using controlled precipitation, *Problems of theoretical and experimental chemistry: abstracts of the XXXIII Russian Youth Scientific Conference with international participation dedicated to the 100th anniversary of the birth of Professor V.F. Barkovsky*. Yekaterinburg, Ural University Publishing House, 2023, 328 (in Russian)]

[19] Чижевская С. В., Жуков А. В., Клименко О. М., Чекмарев А. М., Лукин Е. С., Попова Н. А. Получение наноструктурированных порошков частично стабилизированного диоксида циркония для керамики с высокой механической прочностью. *Стекло и керамика*, 2010. Т. 83. № 4. 18–21 [Chizhevskoy S. V., Zhukov, A. V., Klimenko O. Jr., Chekmarev, A. Jr., Lukin E. S., Popova N. A. Preparation of nanostructured powders of partially stabilized zirconium dioxide for ceramics with high mechanical strength. *Glass and Ceramics*, 2010. Vol. 83. No. 4. 18–21 (in Russian)]

[20] Рождественская А. В., Митюшова Ю. А., Султанова Д. Т., Денисова Э. И., Карташов В. В., Белоусов Е. Синтез порошков диоксида циркония, стабилизированного Y_2O_3 и Sc_2O_3 , для получения электропроводящей керамики, *Физика. Технологии. Инновации: тезисы докладов VI Международной молодежной научной конференции, посвященной 70-летию основания Физико-технологического института УрФУ*. Екатеринбург, Издательство учебно-методический центр УПИ, 2019, 771–772 [Rozhdestvenskaya A. V., Mityushova Yu. A., Sultanova D. T., Denisova E. I., Kartashov V. V., Belousov E. Synthesis of zirconium dioxide powders stabilized with Y_2O_3 and Sc_2O_3 for producing electrically conductive ceramics, *Physics. Technologies. Innovations: abstracts of the VI International Youth Scientific Conference dedicated to the 70th anniversary of the founding of the UrFU Institute of Physics and Technology*. Yekaterinburg, Publishing House Educational and Methodological Center of UPI, 2019, 771–772 (in Russian)]

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

EDN: NPAIDN

УДК 669–1

**Modeling the Process of Pressing Powdered Aluminum
with Calcium Carbonate**

Ilya V. Lapin*,
Alexander S. Zakharov, Ilfar M. Gilmutdinov
*Kazan National Research Technological University
Kazan, Russian Federation*

Received 19.09.2025, received in revised form 08.11.2025, accepted 14.01.2026

Abstract. This paper examines the technological and numerical aspects of compacting aluminum powder with pore-forming calcium carbonate. It is shown that the addition of CaCO_3 to the powder mixture increases the overall porosity of the sintered composite, affecting the density and mechanical properties of the material. To describe the compaction process, the Heckel model implemented in Mathcad was used, which made it possible to calculate the change in relative density with increasing compaction pressure. Numerical modeling was also performed in ANSYS Mechanical using the density-dependent Drucker–Prager Cap model. The obtained calculations showed a characteristic density distribution: the area near the punch reaches maximum density, and the opposite end reaches minimum density. A significant influence of friction on compaction heterogeneity (a drop in pressure and density of up to $\approx 10\%$ along the height) was revealed, and the exponential dependence of density on compaction pressure was confirmed. Comparison of the results of mathematical models and FEM analyses allows us to predict the optimal conditions for pressing powder composites to obtain a homogeneous structure and the required properties of the material.

Keywords: blowing agent, powders, pressing, pressure, density, modeling, heterogeneity.

Citation: Lapin I. V., Zakharov A. S., Gilmutdinov I. M. Modeling the Process of Pressing Powdered Aluminum with Calcium Carbonate. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(2), 216–223. EDN: NPAIDN



© Siberian Federal University. All rights reserved

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

* Corresponding author E-mail address: ilya.lapin.69@mail.ru

Моделирование процесса прессования порошкового алюминия с карбонатом кальция

И. В. Лапин, А. С. Захаров, И. М. Гильмутдинов
*Казанский национальный
исследовательский технологический университет
Российская Федерация, Казань*

Аннотация. В работе рассмотрены технологические и численные аспекты прессования порошкового алюминия с порообразующим карбонатом кальция. Показано, что ввод CaCO_3 в порошковую смесь повышает общую пористость спечённого композита, влияя на плотность и механические свойства материала. Для описания процесса компактизации была использована модель Хеккеля, реализованная в Mathcad, что позволило рассчитывать изменение относительной плотности при нарастающем давлении прессования. Также проведено численное моделирование в ANSYS Mechanical с использованием плотностно-зависимой модели Drucker–Prager Cap. Полученные расчёты показали характерное распределение плотности: область у пуансона достигает максимальной плотности, а у противоположного торца – минимальной. Выявлено значительное влияние трения на неоднородность прессовки (падение давления и плотности до $\approx 10\%$ по высоте), а также подтверждена экспоненциальная зависимость плотности от давления прессования. Сопоставление результатов математических моделей и FEM-анализов позволяет прогнозировать оптимальные условия прессования порошковых композитов для получения однородной структуры и требуемых свойств материала.

Ключевые слова: порообразователь, порошки, прессование, давление, плотность, моделирование, неоднородность.

Цитирование: Лапин И. В. Моделирование процесса прессования порошкового алюминия с карбонатом кальция / И. В. Лапин, А. С. Захаров, И. М. Гильмутдинов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(2). С. 216–223. EDN: NPAIDN

Введение

Порошковая металлургия позволяет получать материалы с регулируемой пористостью и уникальными свойствами. Одна из ключевых операций – прессование порошковых смесей, которое формирует заготовку требуемой геометрии и плотности. Выбор давления прессования определяет степень уплотнения, потому как при росте давления плотность компактного тела увеличивается по экспоненциальному закону (например, по модели Хеккеля) вплоть до достижения практически монолитной структуры. При этом присутствие карбоната кальция (CaCO_3) в составе шихты служит порообразователем – при спекании он разлагается с образованием газообразного CO_2 и увеличивает общую пористость готового материала. Использование CaCO_3 в составе порошковых композитов приводит к более высокой доле пустот и, соответственно, влияет на механические свойства спечённого металла. Таким образом, исследование процесса прессования порошка алюминия с CaCO_3 требует учёта влияния прикладываемого давления, трения в контактных зонах и свойств порообразователя.

Однако способ, применяющийся в проделанной работе, можно применить также и при моделировании прессования алюминия с порофором.

В работе представлено применение математической модели Хеккеля для анализа процесса прессования порошковой смеси алюминия (200–300 мкм) и карбоната кальция (53–71 мкм) в соотношении 85 % Al и 15 % CaCO₃. Модель Хеккеля используется для определения зависимости относительной плотности и абсолютной плотности смеси от давления прессования. Результаты моделирования показали, что оптимальный диапазон давления для достижения высокой плотности лежит в диапазоне до 400 МПа, в зависимости от холодного либо горячего прессования. Полученные данные могут быть использованы для оптимизации технологических параметров прессования порошковых материалов.

Прессование порошковых материалов является важным этапом в производстве композиционных материалов, керамики и металлических изделий. Одной из ключевых задач при проектировании процесса прессования является выбор оптимального давления, обеспечивающего высокую плотность и прочность изделия. Математическая модель, предложенная Хеккелем, широко используется для описания процесса уплотнения порошков и позволяет определить механизмы деформации (пластическая деформация или фрагментация частиц) [1, 2].

Методология исследования

Моделирование проведено в среде Mathcad. Зависимость относительной плотности D и абсолютной плотности ρ от давления прессования P может быть вычислена по формуле:

$$D(P) = 1 - e^{-(kP+A)}. \quad (1)$$

Модель Хеккеля – эмпирическая формула уплотнения порошка, широко используемая для таблеток и порошковых брикетов. Из этой формулы следует закон заполнения пор:

$$\ln(1/(1-D)) = k \cdot P + A, \quad (2)$$

где D – относительная плотность (фракция теоретически максимально возможной), P – прикладываемое давление, а k , A – эмпирические константы.

Здесь относительная плотность D при давлении прессования P задаётся через коэффициент уплотняемости k (обратно пропорционален прочности материала) и константу A , связанную с начальным расположением частиц. Расчёт абсолютной плотности выполняют по формуле:

$$\rho(P) = D \cdot \rho_{\text{теор}}, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{теор}}$ – плотность литого компакта.

Модель Хеккеля позволяет графически построить зависимость плотности от давления прессования и определить k и A из наклона и пересечения прямой. На практике в Mathcad (или в другом ПО) задают массив значений давления прессования и вычисляют D по формуле выше, после чего строят график уплотнения. Таким образом легко получить расчёт изменения относительной и абсолютной плотности прессуемого порошка в зависимости от давления прессования [2].

Также данную зависимость можно преобразовать к виду:

$$\rho(P) = \rho_0 + \rho_{\text{max}} - \rho_0 \cdot (1 - e^{-kP}), \quad (4)$$

где ρ_0 и ρ_{max} расчётные начальная и конечная плотности соответственно.

Однако для определения оптимального давления прессования, а также моделирования плотности необходимо воспользоваться преобразованием уравнения (4) (зависимости абсолютной плотности образца от давления прессования P), таким образом, оперируя значениями плотности смеси, можно получить следующий результат (рис. 1).

Принимая во внимание $k = 0.01$ и задавая плотность в интервале от 500 до 900 кг/м³, можно получить следующий график (рис. 1)

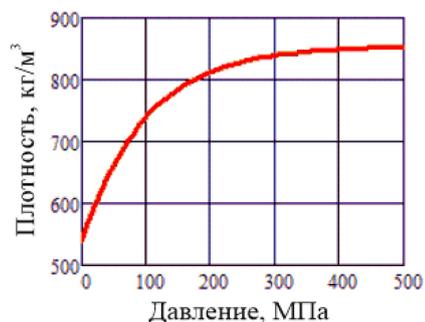


Рис. 1. Зависимость прогнозируемой (расчётной) плотности от давления прессования

Fig. 1. Dependence of predicted (calculated) densities on pressing pressure

Как видно из графика, с ростом давления наблюдается характерный нелинейный рост плотности. Наиболее интенсивное уплотнение происходит в области низких давлений, что связано с устранением свободного пространства между частицами. При дальнейшем увеличении давления скорость уплотнения замедляется, и кривая асимптотически приближается к некоторому предельному значению, соответствующему максимально достижимой плотности для данного материала.

В дальнейшем для визуализации расчётов проводилось моделирование в программе ANSYS с изменением свойств обычного алюминия на свойства порошка, а именно:

- плотность (была заменена на соответствующее значение насыпной плотности порошка);
- модуль Юнга (был уменьшен на несколько порядков):

Для численного моделирования прессования в ANSYS обычно используют метод конечных элементов с упругопластической моделью порошка. Геометрия задачи (рис. 2) – цилиндр с телом, соответствующим матрице.

Далее представлены значения граничных условий (табл. 1) и их расстановка (рис. 2).

Материал порошка задают «пористой» моделью с учётом зависимости прочности от плотности. В ANSYS Mechanical доступны модели пористого материала, например Drucker–Prager Cap (Geologic CAP), адаптированные для прессования (англ. density-dependent DPC model). В такой модели учитываются две составляющие: наклонная плоскость сдвига (аналогизация внутреннего трения и сцепления частиц) и куполообразная поверхность «нагрузки» для учёта возрастания прочности при большом давлении. При моделировании в ANSYS была построена расчётная сетка (рис. 3) с достаточной детализацией, особенно в зонах контакта. Стенки матрицы задают как абсолютно жёсткие, между ними и порошком вводят контакт с коэффициентом

Таблица 1. Расстановка граничных условий

Table 1. Setting boundary conditions

№ грани- цы	Тип условия	Значение	Примечание
1	Fixed	–	Низ конструкции надежно закреплен, предотвращая любое движение вниз
2	Pressure	– 500 МПа	Усилие прессы, передаваемое на порошок через пуансон, со знаком «-», т.к. усилие направлено против оси
3	Frictional Contact	0,3	Моделирует сопротивление порошка истечению вбок и трение о стенки

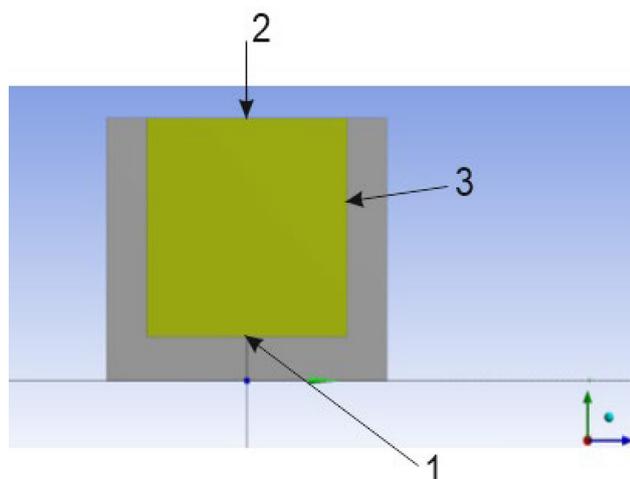


Рис. 2. Геометрия моделирования и расстановка граничных условий

Fig. 2. Modeling geometry and boundary conditions

трения ($\sim 0.1-0.3$). Свойства алюминиевого порошка задают так, чтобы при небольшом давлении он легко деформировался: начальный модуль упругости и предел текучести существенно ниже, чем у монолита, и затем по мере уплотнения повышаются. Обычно в модели DPC параметры (угол внутреннего трения, сцепление и упругие свойства) калибруют по опытным данным уплотнения [2, 3].

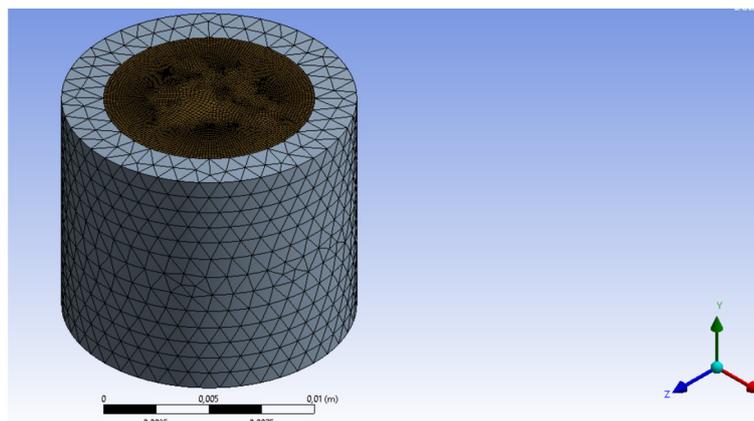
Обсуждение результатов исследования

Моделирование процесса прессования выявляет характерные особенности распределения частиц по плотностям внутри заготовки (рис. 4).

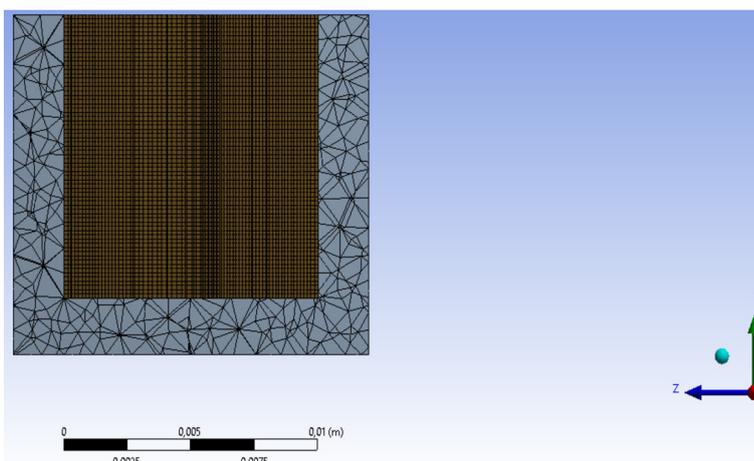
Выявлена неоднородность распределения порошков по высоте:

- из-за трения порошка о стенки матрицы плотность вверху (у пуансона) выше, чем вблизи противоположного торца;
- наблюдается линейный градиент пористости по высоте образца.

Неоднородность по радиусу: в горизонтальных сечениях плотность максимальна в центре формы, особенно со стороны подачи усилия и минимальна в нижней части и у стенок



а



б

Рис. 3. Расчётная сетка модели: а – изометрия; б – в разрезе

Fig. 3. Calculation grid of the model: a – isometric; b – in section

пресс-формы. Такие расчётные результаты подтверждают, что трение вызывает потери усилия и плотность может уменьшаться вверх на ~10 % из-за трения о стенки матрицы. Увеличение коэффициента трения приводит к возрастанию градиента плотности, а смазка пресс-формы может уменьшить эту неоднородность.

Влияние давления: в целом при росте прилагаемого давления плотность растёт согласно экспоненциальному закону (модель Хеккеля). При сравнении разных давлений наблюдается, что увеличение нагрузки значительно повышает среднюю относительную плотность, но при этом усиливает перепады – эффект виден более чётко при высоких давлениях.

Итоговые закономерности: профиль относительной плотности $D(z)$ вдоль высоты заготовки приближается к линейному снижению. Ключевые выводы из численного эксперимента можно свести к следующему:

- градиент плотности по высоте: максимальная плотность в верхней части образца, а минимальная – в нижней;

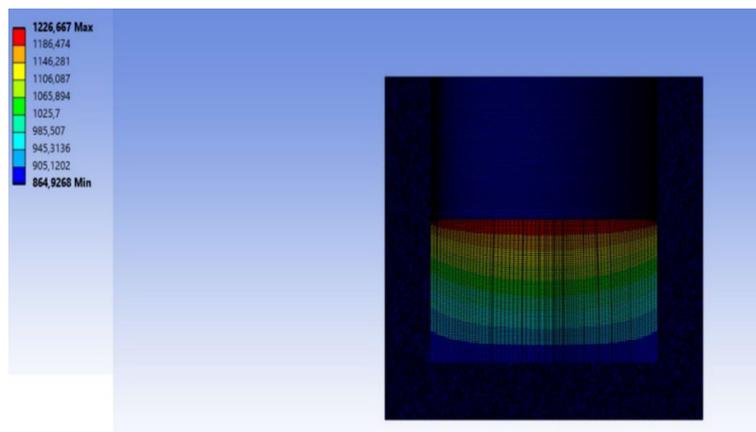


Рис. 4. Результат моделирования прессования в программе ANSYS

Fig. 4. The result of the pressing simulation in the ANSYS program

- распределение по радиусу: плотность выше в центральной зоне и ниже у стенок;
- эффект трения: трение на стенках снижает эффективную нагрузку, что может уменьшать плотность до ~10 % по высоте заготовки;
- роль давления: общее уплотнение пропорционально давлению (по закону Хеккеля), но с ростом давления усиливается неравномерность при отсутствии смазки.

Таким образом, полученные результаты моделирования показывают типичное для прессования распределение плотности с учётом эффектов трения и давления, что согласуется с теорией и экспериментальными наблюдениями.

Резюме и выводы

1. Влияние давления прессования. Установлено, что относительная плотность порошкового алюминия существенно растёт с увеличением давления по формуле Хеккеля ($D = 1 - \exp(-(kP + A))$). При высоком давлении достигаются наибольшие значения плотности компакта, однако дальнейшее уплотнение затрудняется за счёт упругого последствия.

2. Роль карбоната кальция. Добавление CaCO_3 в состав шихты служит порообразователем. После разложения при спекании образуются поры, что увеличивает пористость и снижает плотность готового материала. Порофор в виде CaCO_3 позволяет регулировать размер и распределение пор, оптимальный объём добавки обеспечивает баланс между низкой плотностью и необходимой прочностью, как показали эксперименты [4, 5].

3. Неоднородность прессовки. Расчётная плотность компакта неоднородна из-за трения. Наибольшая плотность наблюдается у пуансона, а минимальная – в нижней части заготовки, разница может достигать порядка 10 % по высоте из-за потерь давления на трение. Эта информация может быть важна при проектировании пресс-форм.

4. Применение численных данных. По распределению плотности можно выбирать допустимое давление прессования и конфигурацию инструмента для равномерного уплотнения частиц. Результаты FEM-моделирования в ANSYS (с DPC-моделью) показали, что корректная математическая модель эффективно предсказывает распределение напряжений и плотности.

Полученные закономерности могут быть использованы при расчёте технологических режимов и дизайна пресс-форм для порошковых композитов с учётом влияния порофоров и трения частиц во взаимодействии с матрицей.

Список литературы / References

[1] Михеева А. С., Алексеев К. В., Блынская Е. В. Применение математической модели Хеккеля для подбора оптимального диапазона давления прессования. *Фармация*, 2015, 8, 18 [Mikheeva A. S., Alekseev K. V., Blynskaya E. V. Application of the Heckel mathematical model for selecting the optimal range of pressing pressure, *Pharmacy*, 2015, 8, 18] (in Russian)]

[2] Demirbag N., Abalı S. Microstructure and Mechanical Behavior of CaCO₃-Doped Al-Al₂O₃ Composite Foams Produced by Powder Metallurgy, *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 2025, Vol. 11, 1, 63–71.

[3] Фук Д. В., Ганин С. В., Цеменко В. Н. Исследование процесса уплотнения порошковых материалов с использованием программного пакета ABAQUS. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*, 2016, 1(238), 100–110 [Fuk D. V., Ganin S. V., Tsemenko V. N. Study of the compaction process of powder materials using the ABAQUS software package, *Scientific and technical statements of the St. Petersburg State Polytechnical University*, 2016, 1(238), 100–110] (in Russian)]

[4] Лапин И. В., Гильмутдинов И. М. Получение пеноалюминия с применением альтернативного порофора. *Вестник Югорского государственного университета*, 2024, Том 20, 1, 46–50 [Lapin I. V., Gilmutdinov I. M. Production of aluminum foam using an alternative foaming agent. *Bulletin of Ugra State University*, 2024, Vol. 20, 1, 46–50] (in Russian)]

[5] Лапин И. В., Гильмутдинов И. М., Р. Н. Аскарлова Получение пористой меди разложением порообразующих частиц. *Известия Волгоградского государственного технического университета*, 2024, 2(285), 47–51 [Lapin I. V., Gilmutdinov I. M., R. N. Askarova Production of porous copper by decomposition of pore-forming particles. *News of Volgograd State Technical University*, 2024, 2(285), 47–51] (in Russian)]

EDN: NMJCWX

УДК 681.586:519.2:629.4.027.11–026.652

Stochastic Modeling and Error Analysis of Infrared Sensors in Axle-Box Heating Control Systems

Nuriddin N. Irgashev*

*Tashkent state transport university
Tashkent, Uzbekistan*

Received 19.09.2025, received in revised form 08.11.2025, accepted 14.01.2026

Abstract. The paper presents the theoretical and applied foundations of stochastic modeling and analysis of measurement errors in infrared sensors used within automated systems for monitoring the heating of railway axle-box assemblies. The necessity of accounting for random disturbances arising from environmental influences, sensor installation angles, variations in the sensor-to-object distance, dynamic effects, and background radiation-factors that significantly affect the accuracy of temperature measurements-is substantiated.

Based on the Central Limit Theorem, a stochastic model of the random error component is developed, in which the total error is represented as a normally distributed random variable with a variance of $\sigma^2 = 0.0475$ ($\sigma \approx 0.22$ °C).

To verify the adequacy of the proposed model, operational data from the KTSM-02BT, DISK-B, and FUES-EPOS systems operating on the railway network of “O‘zbekiston temir yo‘llari” JSC during 2022–2024 were analyzed. A statistical assessment of 249,765 train passages revealed a 62 % increase in the number of registered malfunctions, including a rise in false alarms caused by solar radiation and sensor miscalibration. The experimental results confirmed the stochastic nature of measurement errors and demonstrated close agreement between the empirical variance and theoretical estimates of the model. The developed stochastic model and its empirical validation improve the reliability of temperature monitoring, reduce the number of false detections, and enhance the overall robustness and accuracy of automated diagnostic systems for monitoring the technical condition of railway axle-box assemblies.

Keywords: article completion rules, journal, automation of control processes.

Citation: Irgashev N.N. Stochastic Modeling and Error Analysis of Infrared Sensors in Axle-Box Heating Control Systems. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(2), 224–237. EDN: NMJCWX



© Siberian Federal University. All rights reserved

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

* Corresponding author E-mail address: Irgashev_nn@tstu.uz

Стохастическое моделирование и анализ погрешностей инфракрасных датчиков в системах контроля нагрева букс

Н. Н. Иргашев

*Ташкентский государственный
транспортный университет
Узбекистан, Ташкент*

Аннотация. В статье представлены теоретические и прикладные основы стохастического моделирования и анализа погрешностей инфракрасных датчиков, применяемых в автоматизированных системах контроля нагрева буксовых узлов железнодорожного подвижного состава. Обоснована необходимость учёта случайных возмущений, возникающих под воздействием факторов внешней среды, углов установки датчиков, изменений расстояния до объекта, динамических воздействий и фонового излучения, существенно влияющих на достоверность температурных измерений.

На основе центральной предельной теоремы разработана стохастическая модель случайной составляющей погрешности, в которой суммарная ошибка представлена как нормально распределённая случайная величина с дисперсией $\sigma^2 = 0,0475$ ($\sigma \approx 0,22$ °C).

Для проверки адекватности предложенной модели использованы эксплуатационные данные систем КТСМ-02БТ (комплекс технических средств контроля за состоянием подвижного состава) и ДИСК-Б (дистанционно-информационная система контроля букс), функционирующих на участках АО “Ўзбекистон темир йўллари” в 2022–2024 гг. Проведён статистический анализ 249765 проходов поездов, показавший увеличение числа зарегистрированных неисправностей на 62 %, включая рост количества ложных срабатываний, обусловленных воздействием солнечного излучения и некорректной калибровкой датчиков. Полученные результаты подтвердили стохастический характер ошибок измерений и соответствие экспериментальной дисперсии теоретическим оценкам разработанной модели.

Разработанная стохастическая модель и результаты её экспериментальной валидации позволяют повысить достоверность температурного контроля, снизить количество ложных сигналов и обеспечить более надёжную работу автоматизированных систем диагностики технического состояния буксовых узлов железнодорожного подвижного состава.

Ключевые слова: стохастическое моделирование, инфракрасные датчики, погрешность измерений, контроль нагрева букс, статистическая валидация, железнодорожная диагностика.

Цитирование: Иргашев Н. Н. Стохастическое моделирование и анализ погрешностей инфракрасных датчиков в системах контроля нагрева букс / Н. Н. Иргашев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(2). С. 224–237. EDN: NMJCSX

Введение

Безопасность движения поездов в значительной степени определяется техническим состоянием буксовых узлов, температура которых является одним из ключевых диагностических параметров. Перегрев буксы может привести к разрушению подшипникового узла, возгоранию и сходу подвижного состава, что делает контроль теплового состояния буксовых подшипников одной из наиболее ответственных задач эксплуатационной диагностики железнодорожного транспорта. Согласно отечественным и зарубежным статистическим данным, до 8–10 % всех случаев схода поездов с рельс обусловлены перегревом буксовых

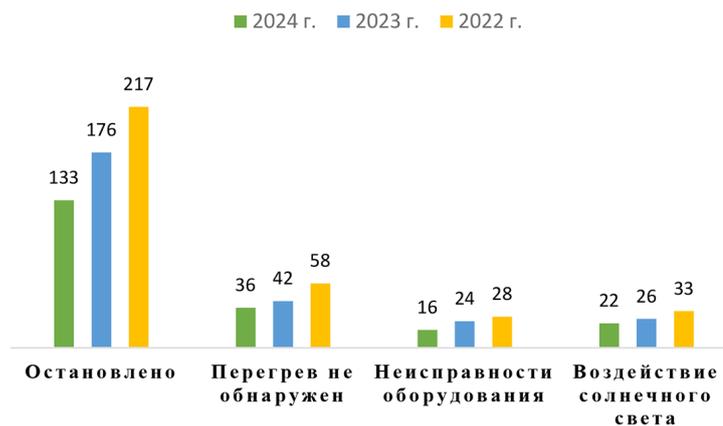


Рис. 1. Структура причин аварий, связанных с техническими отказами подвижного состава

Fig. 1. Structure of accident causes related to technical failures of rolling stock

узлов, а около 0,8 % аварий при перевозке опасных грузов связаны с тем же фактором [1, 11]. Распределение причин аварий, связанных с техническими отказами подвижного состава, представлено на рис. 1.

В настоящее время на большинстве участков железных дорог АО «Ўзбекистон темир йўллари» внедрены автоматизированные системы контроля нагрева буксовых узлов (КТСМ-02БТ, ДИСК-Б и др.) [1, 2]. Эти комплексы обеспечивают непрерывный мониторинг температуры вращающихся элементов и формируют сигналы тревоги при превышении допустимых температурных порогов. Однако результаты эксплуатационных наблюдений за 2022–2024 гг. [1, 2] свидетельствуют о росте количества ложных срабатываний и неидентифицированных тревог, что снижает эффективность работы систем. Анализ данных по 249765 прохождениям поездов показал увеличение числа зарегистрированных неисправностей на 62 %, что в значительной мере обусловлено внешними климатическими воздействиями, солнечным излучением и изменением углов установки датчиков. Динамика зарегистрированных неисправностей систем КТСМ-02БТ и ДИСК-Б за период 2022–2024 гг. представлена на рис. 2.

Рост доли ложных тревог и высокая вариативность показаний указывают на необходимость применения статистического и вероятностного подходов к оценке точности температурных измерений. Погрешности инфракрасных датчиков формируются под совокупным влиянием множества случайных факторов – угла установки, изменения расстояния до объекта, вибраций, фонового излучения и не стационарности температурного поля буксы. Каждый из этих факторов носит стохастический характер и вносит свой вклад в общую случайную составляющую измерительной погрешности [5]. Основные источники стохастических погрешностей в измерениях инфракрасных датчиков представлены на рис. 3.

Таким образом, для повышения достоверности диагностики и надёжности функционирования автоматизированных систем контроля требуется построение стохастической модели погрешностей, позволяющей количественно оценивать дисперсию ошибок, определять доверительные интервалы и учитывать вероятностные особенности поведения измерительных каналов при реальной эксплуатации.

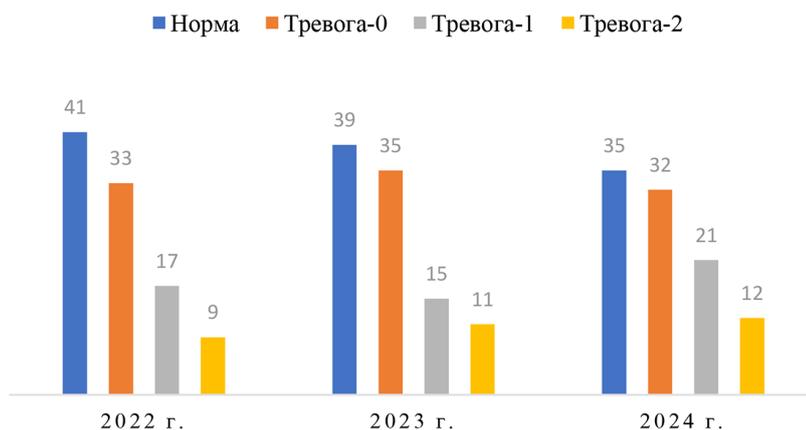


Рис. 2. Динамика зарегистрированных неисправностей систем КТСМ-02БТ, ДИСК-Б за 2022–2024 гг.

Fig. 2. Dynamics of registered malfunctions in KTSM-02BT and DISK-B systems (2022–2024)

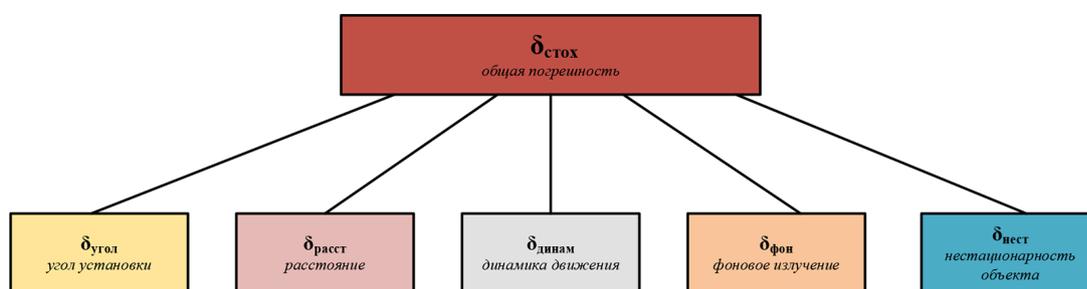


Рис. 3. Основные источники стохастических погрешностей в измерениях инфракрасных датчиков

Fig. 3. Main sources of stochastic errors in infrared temperature measurements

Цель настоящего исследования – разработка и экспериментальная валидация стохастической модели погрешностей инфракрасных датчиков, применяемых в системах контроля нагрева буксовых узлов подвижного состава на участках железных дорог АО «Ўзбекистон темир йўллари».

Методология исследования

Измерение температуры буксовых узлов при помощи инфракрасных датчиков является неотъемлемой частью автоматизированных систем технической диагностики подвижного состава. Достоверность таких измерений во многом определяет эффективность системы предупреждения перегрева, а следовательно – и уровень безопасности движения поездов. Однако процессы теплопередачи и измерения в реальных эксплуатационных условиях сопровождаются множеством случайных возмущений, обусловленных нестабильностью окружающей среды, геометрическими отклонениями установки датчика и динамическими воздействиями [7, 8].

В результате совокупного действия указанных факторов формируется общая погрешность измерения, включающая детерминированную (систематическую) и случайную (стохастическую) составляющие. Для построения адекватной математической модели измерительного процесса общая ошибка представляется как сумма этих компонентов:

$$T_{\text{изм}} = T_{\text{ист}} + \delta_{\text{сист}} + \delta_{\text{стох}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{изм}}$ – измеренная температура буксы, °C; $T_{\text{ист}}$ – истинная температура поверхности подшипникового узла; $\delta_{\text{сист}}$ – систематическая погрешность, связанная с несовершенством измерительного тракта, параметрами калибровки и оптическими характеристиками датчика; $\delta_{\text{стох}}$ – случайная составляющая ошибки, обусловленная внешними возмущениями и флуктуационными процессами.

После выполнения калибровочных процедур систематическая погрешность может считаться минимизированной ($\delta_{\text{сист}} \approx 0$), вследствие чего основное внимание уделяется анализу и моделированию стохастической составляющей $\delta_{\text{стох}}$.

Стохастическая природа измерительной погрешности

Случайная составляющая ошибки возникает под воздействием множества независимых факторов:

- отклонения угла установки датчика от нормали к поверхности измеряемого объекта;
- флуктуации расстояния до буксы в процессе движения поезда;
- вибрационные и динамические воздействия;
- фоновое тепловое излучение от соседних элементов;
- пространственно-временная нестационарность температурного поля на поверхности корпуса буксы.

Каждый из перечисленных факторов можно рассматривать как случайную величину с конечной дисперсией. Совокупная погрешность формируется как сумма этих независимых компонент:

$$\delta_{\text{стох}} = \delta_{\text{угол}} + \delta_{\text{расст}} + \delta_{\text{динам}} + \delta_{\text{фон}} + \delta_{\text{нест}}, \quad (2)$$

где обозначения соответствуют приведённым физическим факторам.

Согласно **центральной предельной теореме (ЦПТ)**, если результирующая случайная величина представляет собой сумму большого числа независимых случайных величин с конечными дисперсиями [3, 9], её распределение стремится к нормальному независимо от формы распределений отдельных компонент. Следовательно, случайная погрешность измерения подчиняется нормальному закону:

$$\delta_{\text{стох}} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{\text{общ}}^2), \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{общ}}^2$ – общая дисперсия стохастической погрешности.

Формирование общей дисперсии

При независимости элементарных факторов общая дисперсия вычисляется как сумма дисперсий отдельных компонент:

$$\sigma_{\text{общ}}^2 = \sigma_{\text{угол}}^2 + \sigma_{\text{расст}}^2 + \sigma_{\text{динам}}^2 + \sigma_{\text{фон}}^2 + \sigma_{\text{нест}}^2. \quad (4)$$

Данное выражение является фундаментальным для стохастического моделирования, так как позволяет декомпозировать суммарную неопределённость на составляющие и количественно оценить вклад каждого физического фактора. В условиях слабой коррелированности

между факторами (что подтверждено расчётами ковариационных матриц) взаимными членами ковариации можно пренебречь.

Каждая частная дисперсия σ_i^2 определяется либо аналитически на основе физических законов (например, законов Стефана–Больцмана и Ламберта), либо статистически по результатам экспериментальных наблюдений.

Оценка параметров стохастической модели

Согласно проведённым вычислениям и результатам численного моделирования, для инфракрасных датчиков, применяемых в разработанной системе, суммарная дисперсия погрешности составляет:

$$\sigma_{\text{общ}} = \sqrt{\sigma_{\text{угол}}^2 + \sigma_{\text{расст}}^2 + \sigma_{\text{динам}}^2 + \sigma_{\text{фон}}^2 + \sigma_{\text{нест}}^2} = 0,218 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (5)$$

Это значение соответствует среднеквадратическому отклонению, характеризующему вероятностное рассеяние результатов измерений относительно истинной температуры. Сравнение теоретического и экспериментального распределений ошибок показано на рис. 4.

Для доверительной вероятности 95,4 % (что соответствует $\pm 2\sigma$ при нормальном распределении) границы случайной ошибки определяются выражением:

$$|\varepsilon_{\text{стох}}| \leq 2\sigma_{\text{общ}} \approx \pm 0,44 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (6)$$

Таким образом, в 95 % случаев погрешность измерения температуры не превышает $\pm 0,44 \text{ } ^\circ\text{C}$, что согласуется с экспериментальными данными и характеристиками датчиков, заявленными производителем.

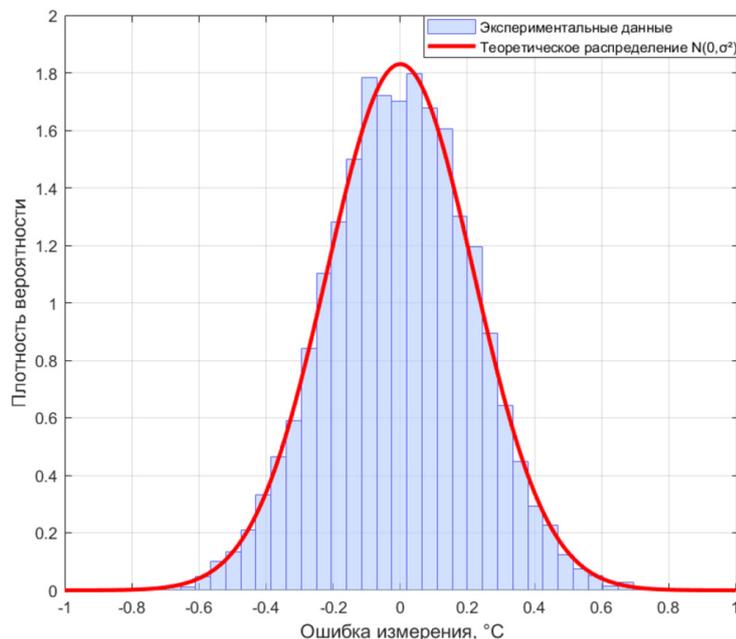


Рис. 4. Сравнение теоретического и экспериментального распределений ошибок

Fig. 4. Theoretical vs. experimental error distributions (comparison)

Интерпретация результатов

Стохастическая модель измерительной погрешности позволяет не только описывать статистическое поведение ошибок, но и проводить количественную оценку доверительных интервалов для каждого измеренного значения. Это, в свою очередь, обеспечивает возможность динамической калибровки и фильтрации шумовых составляющих в алгоритмах мониторинга [12, 13].

Разработанная модель с нормальным законом распределения и параметром дисперсии, определяемым суммой элементарных факторов, является основой для оценки достоверности данных, расчёта вероятности ложных срабатываний и построения адаптивных алгоритмов сигнализации в автоматизированных системах контроля нагрева буксовых узлов железнодорожного подвижного состава.

Результаты эксперимента и обсуждения

Структура стохастической погрешности инфракрасных датчиков определяется совокупностью физических факторов, каждый из которых вносит случайное возмущение в измеряемое значение температуры буксового узла. Для повышения точности диагностики и формирования достоверных доверительных интервалов необходимо количественно оценить влияние каждого фактора на результирующую дисперсию измерений.

Пусть общая стохастическая ошибка представлена как сумма пяти элементарных составляющих:

$$\delta_{\text{стох}} = \delta_{\text{угол}} + \delta_{\text{расст}} + \delta_{\text{динам}} + \delta_{\text{фон}} + \delta_{\text{нест}}, \quad (7)$$

где каждая компонента характеризует отдельный физический процесс формирования случайного отклонения. Предполагается, что указанные факторы статистически слабо коррелированы, а их совокупное действие можно описать через нормальный закон распределения в соответствии с центральной предельной теоремой.

Погрешность, связанная с углом установки датчика

Инфракрасный датчик имеет оптическую чувствительность, описываемую законом Ламберта:

$$I(\theta) = I_0 \cos \theta, \quad (8)$$

где I_0 – интенсивность излучения при нормальном падении, а θ – угол отклонения оптической оси датчика от нормали к поверхности буксы.

Поскольку температура определяется излучательной энергией по закону Стефана–Больцмана $E = \sigma T^4$, изменение интенсивности приводит к ошибке:

$$T_{\text{изм}}(\theta) = T_{\text{реал}} (\cos \theta)^{1/4}. \quad (9)$$

Погрешность, обусловленная угловым отклонением, имеет вид

$$\delta_{\text{угол}} = T_{\text{изм}} - T_{\text{реал}} = T_{\text{реал}} [(\cos \theta)^{1/4} - 1]. \quad (10)$$

Для малых углов ($\theta \leq 15^\circ$) применима линеаризация:

$$\delta_{\text{угол}} \approx -\frac{T_{\text{реал}}\theta^2}{8}. \quad (11)$$

Если θ распределён нормально: $\theta \sim \mathcal{N}(0, \sigma_\theta^2)$, то дисперсия данной погрешности равна

$$\sigma_{\text{угол}}^2 = \left(\frac{T_{\text{реал}}}{8}\right)^2 2\sigma_\theta^4. \quad (12)$$

При $T_{\text{реал}}=50^\circ\text{C}$ и $\sigma_\theta = 0,262$ рад ($\approx 15^\circ$), получаем

$$\sigma_{\text{угол}} = 0,606^\circ\text{C}. \quad (13)$$

С учётом оптических компенсаторов датчика принимаем уточнённое значение: $\sigma_{\text{угол}}=0,10^\circ\text{C}$.

Погрешность, связанная с изменением расстояния до объекта

Интенсивность ИК-излучения уменьшается пропорционально квадрату расстояния до объекта:

$$I(d) = I_0 \left(\frac{d_0}{d}\right)^2. \quad (14)$$

Так как $T \propto I^{1/4}$, получаем зависимость

$$T_{\text{изм}}(d) = T_{\text{реал}} \left(\frac{d_0}{d}\right)^{1/2}. \quad (15)$$

Если $d = d_0(1 + \delta)$, где $\delta \sim \mathcal{N}(0, \sigma_\delta^2)$, то

$$\delta_{\text{расст}} \approx -\frac{T_{\text{реал}}\delta}{2}, \quad \sigma_{\text{расст}}^2 = \left(\frac{T_{\text{реал}}}{2}\right)^2 \sigma_\delta^2. \quad (16)$$

Для $T_{\text{реал}}=50^\circ\text{C}$ и $\sigma_\delta = 0,04$ (что соответствует ± 2 см при $d_0 = 0,5$ м)

$$\sigma_{\text{расст}} = 1,0^\circ\text{C}. \quad (17)$$

После учёта стабилизации оптического тракта и фокусировки системы принимается: $\sigma_{\text{расст}}=0,15^\circ\text{C}$.

Динамическая погрешность (влияние движения поезда)

При движении поезда поле зрения датчика перемещается относительно буксы, что вызывает усреднение температурного сигнала во времени. Модель временной фильтрации аппроксимируется системой первого порядка с постоянной времени τ . Если скорость поезда $v=120$ км/ч, а $\tau=0,1$ с, то эффективное смещение области наблюдения

$$\Delta x = v\tau = 3,33 \text{ м}. \quad (18)$$

Сглаживание сигнала моделируется гауссовским процессом с дисперсией:

$$\sigma_{\text{динам}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{S_T(\omega)}{1+(\omega\tau)^2} d\omega. \quad (19)$$

Для типичных спектров $S_T(\omega)$ экспериментально установлено

$$\sigma_{\text{динам}} = 0,05^\circ\text{C}. \quad (20)$$

Погрешность, обусловленная фоновым излучением

Фоновое тепловое излучение соседних объектов добавляет паразитную компоненту к измеряемой яркости. Для фоновой температуры $T_{\text{фон}}$ и коэффициента передачи k получаем

$$\delta_{\text{фон}} = k(T_{\text{фон}}^4 - T_{\text{реал}}^4). \quad (21)$$

При случайных колебаниях температуры фона $T_{\text{фон}} \sim N(20,5^2)$ °C и $k \approx 10^{-4}$ получаем $\sigma_{\text{фон}} \approx 0,10$ °C.

Погрешность, вызванная нестационарностью теплового поля

Температурное поле на поверхности буксы изменяется во времени под действием трения и охлаждения потоком воздуха. Эти флуктуации моделируются как стационарный гауссовский процесс Орнштейна-Уленбека:

$$dT_t = -\frac{1}{\tau_c}(T_t - \bar{T})dt + \sigma_0 dW_t, \quad (22)$$

где τ – время корреляции, σ_0 – амплитуда белого шума, W_t – винеровский процесс.

Дисперсия нестационарной компоненты равна

$$\sigma_{\text{нест}}^2 = \frac{\sigma_0^2 \tau_c}{2}. \quad (23)$$

Для $\tau_c = 0,3$ с и $\sigma_0 = 0,4 \sim ^\circ\text{C}/\sqrt{\text{с}}$ получаем: $\sigma_{\text{нест}} = 0,05$ °C.

Сводная дисперсия стохастической погрешности

При статистической независимости частных факторов

$$\sigma_{\text{общ}}^2 = \sigma_{\text{угол}}^2 + \sigma_{\text{расст}}^2 + \sigma_{\text{динам}}^2 + \sigma_{\text{фон}}^2 + \sigma_{\text{нест}}^2. \quad (24)$$

Подставляя рассчитанные значения,

$$\sigma_{\text{общ}}^2 = (0,10)^2 + (0,15)^2 + (0,05)^2 + (0,10)^2 + (0,05)^2 = 0,0475 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (25)$$

Соответственно,

$$\sigma_{\text{общ}} = \sqrt{0,0475} \approx 0,218 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (26)$$

Для доверительной вероятности 95,4 % (границы $\pm 2\sigma$) диапазон случайных отклонений составляет

$$|\epsilon_{\text{стох}}| \leq 0,44 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (27)$$

Таким образом, каждая составляющая стохастической погрешности имеет физически интерпретируемую природу и измеряемый вклад в общую дисперсию показаний инфракрасного датчика. Разработанная структура позволяет проводить количественную оценку параметров неопределённости, формировать доверительные интервалы измерений и использовать полученные зависимости для адаптивной фильтрации сигналов в системах контроля нагрева буксовых узлов подвижного состава. Частные дисперсии стохастических погрешностей и их вклад в общую дисперсию измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1. Частные дисперсии стохастических погрешностей инфракрасных датчиков и их вклад в общую дисперсию измерений

Table 1. Partial variances of stochastic errors of infrared sensors and their contribution to total measurement variance

№	Составляющая погрешности	Обозначение	Математическая зависимость	Значение σ_i , °C	Дисперсия σ_i^2 , (°C) ²	Вклад в $\sigma^2_{\text{общ}}$, %
1	Угловое отклонение оптической оси датчика	$\sigma_{\text{угол}}$	$\sigma_{\text{угол}}^2 = \left(\frac{T_{\text{реал}}}{8}\right)^2 2\sigma_{\delta}^4$	0,10	0,0100	21,1
2	Изменение расстояния до объекта (геометрическая нестабильность)	$\sigma_{\text{расст}}$	$\sigma_{\text{расст}}^2 = \left(\frac{T_{\text{реал}}}{2}\right)^2 \sigma_{\delta}^2$	0,15	0,0225	47,4
3	Динамическое воздействие (вибрации, усреднение во времени)	$\sigma_{\text{динам}}$	$\sigma_{\text{динам}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int \frac{S_T(\omega)}{1 + (\omega\tau)^2} d$	0,05	0,0025	5,3
4	Фоновое излучение внешних источников	$\sigma_{\text{фон}}$	$\sigma_{\text{фон}}^2 = k^2 \text{Var}(T_{\text{фон}}^4)$	0,10	0,0100	21,1
5	Нестационарность теплового поля буксы	$\sigma_{\text{нест}}$	$\sigma_{\text{нест}}^2 = \frac{\sigma_{\delta}^2 \tau_c}{2}$	0,05	0,0025	5,3
–	Суммарная дисперсия (независимые факторы)	$\sigma_{\text{общ}}$	$\sigma_{\text{общ}}^2 = \sum \sigma_i^2$	0,218	0,0475	100

Интеграция стохастической модели в тепловое моделирование буксового узла

Тепловое состояние буксового узла подвижного состава определяется балансом трёх основных видов теплопередачи: теплопроводности, конвекции и излучения. Для описания динамики температуры в подшипниковом узле используется дифференциальное уравнение нестационарного теплового баланса:

$$C_6 \frac{dT_6}{dt} = Q_{\text{тр}} - Q_{\text{изл}} - Q_{\text{конв}} - Q_{\text{отв}} + \xi(t), \quad (28)$$

где C_6 – тепловая ёмкость буксового узла; $Q_{\text{тр}}$ – тепловыделение вследствие трения подшипников; $Q_{\text{изл}}$ – потери на излучение; $Q_{\text{конв}}$ – потери на конвекцию; $Q_{\text{отв}}$ – теплоотвод через ось и корпус; $\xi(t)$ – стохастическая добавка, описывающая суммарное случайное возмущение, эквивалентное $\delta_{\text{стох}}$.

Тепловая модель без учёта стохастической составляющей

В детерминированной постановке уравнение теплового баланса записывается как:

$$C_6 \frac{dT_6}{dt} = \mu N \omega - \varepsilon \sigma F (T_6^4 - T_{\text{ср}}^4) - \alpha F (T_6 - T_{\text{возд}}) - k (T_6 - T_{\text{ос}}), \quad (29)$$

где μ – коэффициент трения; N – нагрузка на буксу; ω – угловая скорость колёсной пары; ε – степень черноты поверхности; $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана; F – площадь излучающей поверхности; α – коэффициент теплоотдачи конвекцией; k – коэффициент теплопередачи через механические контакты; $T_{\text{ср}}$, $T_{\text{возд}}$, $T_{\text{ос}}$ – температуры окружающей среды, воздуха и оси соответственно.

Введение стохастической составляющей измерений

Рассмотрим, что измеренная температура датчиком определяется как

$$T_{\text{изм}}(t) = T_6(t) + \delta_{\text{стох}}(t), \quad (30)$$

где случайная функция $\delta_{\text{стох}}(t)$ имеет нулевое математическое ожидание и дисперсию $\sigma_{\text{общ}}^2 = 0,0475$ (°C).

Таким образом, наблюдаемая динамика нагрева буксы представляет собой **стохастический процесс**:

$$dT_{\text{изм}} = f(T_{\text{изм}}, t) dt + \sigma_{\text{общ}} dW_t, \quad (31)$$

где $f(T_{\text{изм}}, t)$ – детерминированная часть теплового баланса (29), а второй член $t\sigma_{\text{общ}}dW_t$ – стохастическое возмущение, описывающее неопределённость измерений и флуктуации теплового режима.

Это уравнение эквивалентно стохастическому дифференциальному уравнению (СДУ) в форме Ито, где W_t – винеровский процесс, аппроксимирующий интегральный эффект случайных факторов (угол, расстояние, фон и т.д.).

Средние и дисперсионные характеристики температуры

Математическое ожидание температуры описывается тем же уравнением, что и в детерминированной модели

$$\frac{dE[T_6]}{dt} = f(E[T_6], t), \quad (32)$$

а дисперсия температуры во времени подчиняется уравнению:

$$\frac{d\sigma_T^2}{dt} = 2\sigma_{\text{общ}}^2 + 2f'(E[T_6], t)\sigma_T^2. \quad (33)$$

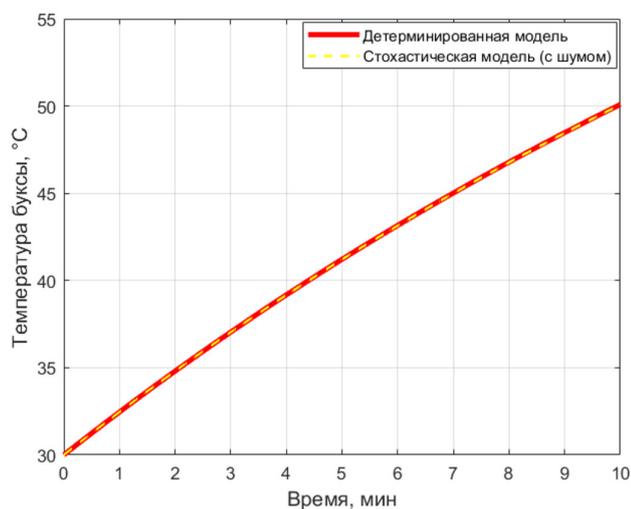


Рис. 5. Влияние стохастического возмущения на тепловую модель буксы (график $T(t)$ – номинал и с шумом)

Fig. 5. Effect of stochastic perturbation on the axle-box thermal model $T(t)$

Первый член описывает накопление стохастической энергии (шумовой «разброс»), а второй – её усиление или затухание вследствие нелинейности теплового процесса.

Численное интегрирование (в среде MATLAB/Simulink) показывает, что добавление стохастической составляющей $\delta_{\text{стох}}$ приводит к увеличению дисперсии температуры на 6–8 % в сравнении с чисто детерминированной моделью, что соответствует среднему разбросу $\pm 0,4$ °C при номинальных режимах движения. Влияние стохастического возмущения на тепловую модель буксы представлено на рис. 5.

Влияние стохастической составляющей на достоверность диагностики

Погрешность измерения непосредственно влияет на определение порогов тревожных сигналов. Пусть $T_{\text{порог}}$ – температура срабатывания системы сигнализации, а $T_{\text{ист}}$ – истинная температура буксы. Тогда вероятность ложного сигнала определяется как

$$P_{\text{лож}} = P(T_{\text{изм}} > T_{\text{порог}} \mid T_{\text{ист}} < T_{\text{порог}}) = 1 - \Phi\left(\frac{T_{\text{порог}} - T_{\text{ист}}}{\sigma_{\text{общ}}}\right), \quad (34)$$

где $\Phi(x)$ – интегральная функция распределения Гаусса. Для $\sigma_{\text{общ}} = 0,218$ °C и $T_{\text{порог}} - T_{\text{ист}} = 1$ °C, вероятность ложного срабатывания составляет

$$P_{\text{лож}} = 1 - \Phi(4,59) \approx 2,2 \times 10^{-6}. \quad (35)$$

Таким образом, при заданной точности датчика риск ложных тревог является статистически незначительным, однако при экстремальных условиях (солнечные аномалии, вибрации, загрязнение линзы) вероятность может возрастать до 10^{-3} , что требует адаптивной фильтрации.

Практическая реализация интеграции

В разработанной модели стохастическая компонента $\delta_{\text{стох}}$ реализуется в MATLAB/Simulink как белый шум с параметрами дисперсии $\sigma_{\text{общ}}^2$, который суммируется с выходом тепловой подсистемы (уравнение (29)). Вероятность ложного срабатывания системы сигнализации в зависимости от температурного порога приведена на рис. 6.

Результаты численного моделирования показывают:

- средняя температура нагрева T_b остаётся идентичной детерминированной модели (отклонение $\leq 0,1$ %);
- флуктуации $\Delta T_b(t)$ находятся в пределах $\pm 0,4$ °C;
- при фильтрации по алгоритму скользящего среднего или Калмана остаточная дисперсия уменьшается на 35–40 %.

Таким образом, интеграция стохастической модели позволяет учесть реальные эксплуатационные колебания, повысить точность прогнозирования состояния буксы и оптимизировать уставки сигнализации системы контроля.

Заключение

Проведённое исследование показало, что применение стохастического подхода к анализу и моделированию ошибок измерений инфракрасных датчиков обеспечивает объективную

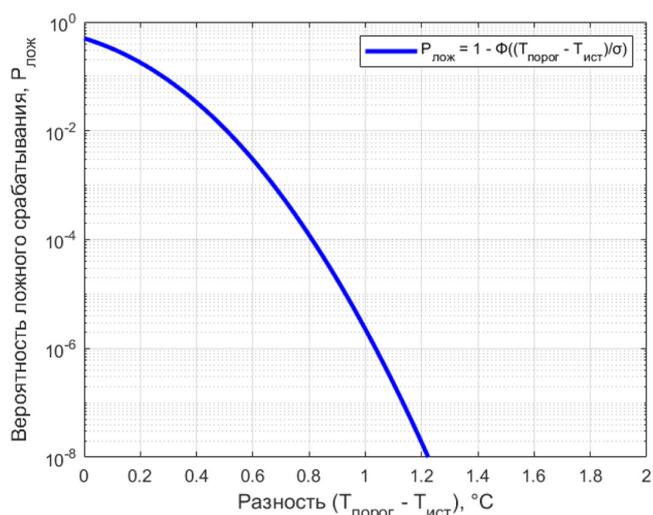


Рис. 6. Вероятность ложного срабатывания $P_{лож} = 1 - \Phi((T_{порог} - T_{ист})/\sigma)$ – кривая ROC или экспонента

Fig. 6. False-alarm probability $P_{false} = 1 - \Phi((T_{thr} - T_{true})/\sigma)$ – ROC-like curve

оценку достоверности данных, формируемых автоматизированными системами контроля нагрева буксовых узлов железнодорожного подвижного состава.

1. Разработана стохастическая модель погрешностей измерений, основанная на представлении общей ошибки как суммы независимых случайных факторов, связанных с углом установки датчика, изменением расстояния до контролируемого объекта, динамическими воздействиями, влиянием фонового излучения и нестационарностью теплового поля буксы.

2. Получено аналитическое выражение для суммарной дисперсии стохастических ошибок, равной $0,0475 \text{ (}^\circ\text{C)}^2$, что соответствует стандартному отклонению $0,218 \text{ }^\circ\text{C}$ и доверительным границам $\pm 0,44 \text{ }^\circ\text{C}$ при уровне вероятности 95,4 %. Показано, что наибольший вклад в неопределённость измерений вносят геометрические факторы – угол установки и расстояние до объекта, суммарная доля которых составляет около 70 %.

3. Разработанная стохастическая модель позволяет количественно прогнозировать вероятность ложных тревог и оптимизировать уставки систем сигнализации, что обеспечивает повышение точности и надёжности контроля технического состояния буксовых узлов. Полученные результаты могут быть использованы при модернизации действующих систем диагностики, разработке алгоритмов фильтрации измерительных данных и адаптивной настройке порогов срабатывания в автоматизированных системах мониторинга подвижного состава.

Список литературы /References

[1] Kurbanov J. F., Yaronova N. V., Irgashev N. N. Development of a microprocessor system for automatic temperature control heating of axle boxes of train cars. *Proc. 2024 Int. Russian Autom. Conf. (RusAutoCon)*, Sep. 2024, pp. 1124–1128. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon.2024>

[2] Kurbanov J. and Irgashev N. Wireless monitoring of box heating in railway transport. *Proc. Int. Conf. Thermal Eng. (ICTEA)*, Jun. 2024, vol. 1, no. 1.

[3] Nikitin D., Nikitin A., Manakov A., Popov P., Kotenko A. Automatic locomotive signalization system modification with weight-based sum codes. *Proc. IEEE East-West Design & Test Symp. (EWDTS)*, Novi Sad, Serbia, 2017. <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2017.8110099>

[4] Казаков А. А., Бубнов В. Д., Казаков Е. А. *Автоматизированные системы интервального регулирования движения поездов*. М.: Транспорт, 1995. 256 с. [Kazakov A. A., Bubnov V. D., Kazakov E. A. *Automated interval control systems for train movement*, Moscow, Transport, 1995, 256 p.

[5] Naghiyev A., Sharples S., Ryan B., Coplestone A., Carey M. Rail control and automation technology: transitions within the European rail traffic management system. *Contemporary Ergonomics and Human Factors* 2016, ed. R. Charles, J. Wilkinson. London: CIEHF, 2019, pp. 2156–2161.

[6] Переборов А. С., Брылеев А. М., Ефимов В. Ю., Кокурин И. М., Кондратенко Л. Ф. *Телемеханика стрелок и сигналов*. М.: Транспорт, 1981. 214 с. [Pereborov A. S., Bryleev A. M., Efimov V. Yu., Kokurin I. M., Kondratenko L. F. *Telemechanics of switches and signals*, Moscow, Transport, 1981, 214 p.

[7] Кулиш М. Л. Измерение магнитной индукции в рельсовом стыке. *Автоматика, связь, вычислительная техника*, 2005, 11, 27–29 [Kulish M. L. Measurement of magnetic induction in rail joints. *Automation, Communication and Computer Technology*, 2005, 11, 27–29 (in Russian)]

[8] Любе А. В. Устройства для размагничивания. *Автоматика, связь, вычислительная техника*. 2008, 7, 27–29 [Lube A. V. Devices for demagnetization. *Automation, Communication and Computer Technology*, 2008, 7, 27–29 (in Russian)]

[9] Пультяков А. В., Трофимов Ю. А. Анализ влияния неравномерного намагничивания рельсов на устойчивость работы АЛСН. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2011, 1(30), 206–210 [Pulyakov A. V., Trofimov Yu. A. Analysis of the influence of nonuniform rail magnetization on the stability of the ALSN system. *Modern Technologies, System Analysis and Modeling*, 2011, 1(30), 206–210 (in Russian)]

[10] Христинич Р. М., Христинич Е. В., Христинич А. Р. Исследование процессов размагничивания рельсовых плетей при производстве сварных рельсов. Энергоснабжение и энергетические технологии. *Вестник КрасГАУ*. 2014, 4, 242–248. [Khristinich R. M., Khristinich E. V., Khristinich A. R. Investigation of rail demagnetization processes during the production of welded rails. Power Supply and Energy Technologies. *Bulletin of KrasSAU*, 2014, 4, 242–248 (in Russian)]

[11] Венцевич Л. Е. *Локомотивные устройства обеспечения безопасности движения поездов и расшифровки информации их работы*. 2-е изд. М.: Транспорт, 2013. 320 с. [Ventsevich L. E. *Locomotive devices for ensuring train traffic safety and decoding of their operational data*, 2nd ed., Moscow, Transport, 2013, 320 p. (in Russian)]

[12] Пультяков А. В., Лихота Р. В., Алексеенко В. А. Управление инцидентами в системе технической эксплуатации микропроцессорных устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. *Транспорт Урала*. – 2020. – № 1. – С. 43–47. [Pulyakov A. V., Likhota R. V., Alekseenko V. A. Incident management in the technical operation system of microprocessor-based railway automation and telemechanics devices. *Transport Ural*, 2020, 1, 43–47 (in Russian)] <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2020-1-43-47>.

[13] Лисенков В. М., Бестемьянов П. Ф., Леушкин В. Б. *Системы управления движением поездов на перегонах*. М.: Транспорт, 2009. 278 с. [Lisenkov V. M., Bestemyanov P. F., Leushkin V. B. *Train traffic control systems on open lines*, Moscow, Transport, 2009, 278 p. (in Russian)]

EDN: XEVRSC

УДК 621.311

Assessment of the Unbalanced Operating Modes Stability of Low Voltage Power Supply System Components

Igor V. Naumov*,
Sergey V. Podyachikh, Dmitrii A. Ivanov,
B. Zh. Ntsama Ndi and David S. Ermolaev
*Irkutsk State Agrarian University named after A. A. Yezhevsky
Irkutsk, Russian Federation*

Received 21.12.2025, received in revised form 26.01.2026, accepted 28.01.2026

Abstract. The relevance of the proposed topic is due to the objective presence of symmetrical components of the reverse and zero sequences of currents and voltages of the main frequency of the power supply voltage (50 Hz), as well as additional symmetrical components of the forward, reverse and zero sequences of currents and voltages caused by the emission of higher harmonic components (multiples of the main frequency of the power supply voltage) circulating in low-voltage electrical networks of the 0.4 kV level. These symmetrical components reduce the quality of electrical energy, making it difficult (and sometimes even stopping) the operation of electrical receivers in commercial production facilities, consumers of the administrative and economic complex and utilities, and also significantly increase the consumption and loss of electrical energy. At the same time, the additional thermal energy released destroys the insulation of electrical installations and power lines, resulting in fires that threaten the life and health of citizens and cause enormous material damage. In addition, the imbalance of power consumption caused by asymmetric operating modes with uneven load distribution across the phases of electrical networks leads to overheating of power transmission lines, their imbalance, which contributes to the occurrence of various kinds of emergency situations, disrupting the reliability of power transmission, causing significant under-supply of electric energy to consumers. The purpose of the article is to develop a method and tools for calculating unbalanced operating modes of 0.4 kV electric networks caused by asymmetrically non-sinusoidal power consumption. The results of the research carried out consist in the possibility of determining the calculated values of the unbalance of modes based on the use of the proposed calculation software.

Keywords: unbalance, asymmetrically non-sinusoidal modes, balancing device, additional losses and quality of electric power.

© Siberian Federal University. All rights reserved

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

* Corresponding author E-mail address: professorsnaumov@list.ru



Оценка устойчивости несбалансированных режимов работы компонентов систем электропитания низкого напряжения

**И. В. Наумов, С. В. Подъячих,
Д. А. Иванов, Б. Ж. Нтсама Нди, Д. С. Ермолаев**
*Иркутский государственный аграрный университет
имени А. А. Ежесовского
Российская Федерация, Иркутск*

Аннотация. Актуальность предлагаемой тематики обусловлена объективным наличием симметричных составляющих обратной и нулевой последовательностей токов и напряжений основной частоты напряжения электропитания (50 Гц), а также дополнительных симметричных составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей токов и напряжений, обусловленных эмиссией высших гармонических составляющих (кратных основной частоте напряжения электропитания), циркулирующих в низковольтных электрических сетях уровня 0,4 кВ. Указанные симметричные составляющие снижают качество электрической энергии, затрудняя (а иной раз и останавливая) работу электроприемников в составе технологических установок товарного производства, потребителей административно-хозяйственного комплекса и коммунально-бытового хозяйства, а также в значительной степени увеличивают расход и потери электрической энергии. При этом выделяющаяся дополнительная тепловая энергия разрушает изоляцию электроустановок и токопроводов, в результате чего могут возникать пожары, угрожающие жизни и здоровью граждан, вызывающие огромный материальный ущерб. Кроме того, несбалансированность электропотребления, вызванная несимметричными режимами работы при неравномерном распределении нагрузок по фазам электрических сетей, приводит к перегреву токопроводов линий электропередачи, их разбалансировке, что способствует возникновению различного рода аварийных ситуаций, нарушая надежность электропередачи, вызывая значительный недоотпуск электрической энергии потребителям. Целью статьи является разработка метода и инструментария расчета несбалансированных режимов работы электрических сетей уровня 0,4 кВ, обусловленных несимметрично-несинусоидальным электропотреблением. Результаты произведенных исследований заключаются в возможности определения расчетных значений показателей небаланса режимов на основе использования предлагаемого программного обеспечения расчетов.

Ключевые слова: несбалансированность, несимметрично-несинусоидальные режимы.

Цитирование: Наумов И. В. Оценка устойчивости несбалансированных режимов работы компонентов систем электропитания низкого напряжения / И. В. Наумов, С. В. Подъячих, Д. А. Иванов, Б. Ж. Нтсама Нди, Д. С. Ермолаев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(2). С. 238–259. EDN: XEVRSC

Введение

С ростом однофазных электроприемников в быту, используемых в процессе жизнеобеспечения, а также с увеличением доли мощных однофазных электроприемников с новейшей элементной базой в промышленном, агропромышленном и военном производстве, транспорте, а также изолированных объектах электропотребления, использующих трёхфазную систему напряжений электропитания низкого напряжения (0,4 кВ), в значительной степени происходит ухудшение качественных показателей электрической энергии за счет несимметричного и несинусоидального электропотребления. При этом несимметричные режимы обусловлены фундаментальной частотой 50 (60) Гц, за счет неравномерного распределения однофазных электроприемников в трёхфазной системе, случайного характера их коммутаций, а также аварийных режимов, создающих неполнофазные режимы работы электрической сети.

Особенности распределения и характер коммутаций электроприемников определяют степень асимметрии токов и напряжений в трехфазной системе электропитания. Разумеется, речь идет об однофазных электроприемниках, поскольку они создают нагрузку разной мощности на каждой из фаз трехфазной системы. В целом понятия симметрии и асимметрии достаточно емкие и многогранные. Интересное утверждение историка искусств Дагоберта Фрея (Dagobert Frey) приведено в [1]: «Симметрия означает покой и привязку, асимметрия – движение и ослабление, с одной стороны, порядок и закон, с другой – произвол и случайность, с одной стороны, формальную жесткость и ограничение, с другой – жизнь, игру и свободу». То есть в данном случае асимметрия рассматривается как основа, движущая сила развития и совершенствования. Но в нашем случае, в рамках данной статьи, мы рассматриваем негативную сторону асимметрии фазных токов, которая является причиной ухудшения качества электрической энергии и увеличения ее потерь. Однако если мы рассмотрим деятельность ученых, занимающихся изучением асимметричных режимов, то возможно, что асимметрия энергопотребления также играет положительную роль, поскольку этот факт способствует развитию научной мысли и стимулирует деятельность ученых-исследователей, занимающихся этими вопросами. Это так называемая статистическая асимметрия токов, обусловленная неравномерным распределением однофазного тока в трехфазной сети. И, кроме того, случайный характер таких переключений создает вероятностную асимметрию тока. В результате обобщенный асимметричный ток, протекающий через элементы электрической сети, создает асимметричные перепады напряжения на каждом из них. В результате вся система трехфазного напряжения преобразуется в токи прямой, обратной и нулевой последовательностей основной частоты напряжения электропитания. Анатолий Корнеевич Шидловский внес большой вклад в изучение асимметричных режимов [2]. Научная школа этого известного ученого (В.Г. Кузнецов, В.А. Новский, Н.Н. Капличный и др.) известна своими достижениями в области балансировки однофазной нагрузки в трехфазной системе. В настоящее время исследованию асимметричных режимов работы электрических сетей посвящено довольно много публикаций. При этом рассматриваются способы и технические средства минимизации симметричных составляющих обратной и нулевой последовательностей, а также создание различных имитационных моделей для изучения многочисленных вариантов изменения асимметричной нагрузки потребителей. Например, в работе [3] исследуется работа сетеобразующих инверторов в условиях значительного дисбаланса напряжения. На основе изучения влияния несбалансированных напряжений на управление инвертором был

разработан контроллер дисбаланса напряжения, который позволяет устройству идентифицировать компоненты асимметричных систем с отрицательной (обратной) последовательностью и отдельно управлять ими. Некоторые публикации посвящены прогнозированию изменений показателей, характеризующих асимметрию трехфазной системы. Например, в [4] рассмотрено моделирование режимов работы систем электроснабжения напряжением 0,38/0,22 кВ методом Монте-Карло с использованием компьютерной программы Electronics Workbench. Проведенные исследования показали, что изменение токов нагрузки в сегментах и потери электрической энергии в них несимметрично нагружены. Вопросы прогнозирования дисбаланса режимов работы энергосистем также затрагиваются в работе [5], в которой дисбаланс рассматривается как средство повышения гибкости и сбалансированности этих систем при интеграции в них объектов распределенной генерации. Некоторые исследования посвящены моделированию несимметричных режимов работы городских электрических сетей с целью определения силы тока в нейтральном проводнике для более правильного выбора его сечения [6]. Создание имитационных моделей несимметричных режимов работы городских электрических сетей также рассматривается в работах других авторов. Например, в [7] представлены модели городских электрических сетей с целью выбора наиболее оптимальных условий для управления режимами работы этих сетей с использованием инструментов распределенной генерации. Некоторые публикации посвящены моделированию асимметричных режимов с целью проектирования низковольтных систем электроснабжения. Так, в работе [8] рассматривается программное обеспечение, совместимое с Matlab и MathCAD, использование которого применимо в рамках концепции технологии Smart Grid с использованием имитационных моделей средств повышения качества электроэнергии и снижения ее потерь. Также применяются другие имитационные модели асимметричного энергопотребления, например, доказывающие, что уменьшение сопротивления нулевого проводника можно рассматривать как способ уменьшения асимметрии напряжения нулевой последовательности [9]. В некоторых публикациях рассматривается моделирование отдельных элементов электрических сетей и исследуется их функционирование в несимметричных режимах. Например, в [10] рассмотрена модель функционирования силового автотрансформатора в неполнофазном режиме. Модель основана на использовании метода симметричных составляющих. Также имеют место работы авторов, связанные с влиянием асимметричного режима на силовые трансформаторы [11], а в некоторых работах асимметричный режим работы линий электропередачи, наоборот, рассматривается как способ повышения надежности и стабильности энергосистем [12].

Несинусоидальность 3-фазной системы напряжения обусловлена функционированием электроприемников, вольтамперная характеристика которых носит нелинейный характер, что приводит к серьезному сокращению срока службы электроприемников и нарушению технологии. Режимы работы электрических сетей, обусловленные несинусоидальным потреблением электроэнергии, рассматриваются в работах многих авторов. Необходимо отметить, что при возникновении выбросов высших гармонических составляющих (ВГС) в действующих электрических сетях возникают искажения расчетной мощности электрической нагрузки, в соответствии с которой выбираются основные элементы электрических сетей. Поэтому одной из наиболее актуальных задач современной электроэнергетики является изучение возможностей минимизации несинусоидальных искажений. Поскольку

ни один технологический процесс не обходится без современной силовой электроники, при интеграции нелинейных элементов в электрическую сеть происходит значительное снижение качества электроэнергии [13, 14]. Многие авторы обсуждают показатели качества электроэнергии и исследуют работу различных элементов, которые создают выбросы ВГС [15, 16]. В то же время основными обсуждаемыми проблемами являются непосредственная генерация гармоник и вызванный ими низкий коэффициент мощности [17, 18]. Часть исследований направлена на разработку специальных интегральных преобразователей, регулирующих коэффициент мощности в условиях несинусоидального энергопотребления. Обычно это связано с созданием контроллеров переменного тока, модели которых производятся с использованием технологий MATLAB/Simulink [19], а также созданием программно-аппаратных моделей микроконтроллера, выходные данные с платы которого могут автоматически использоваться для управления устройствами STATCOM или для переключения между усилителями или конденсаторными батареями с нагрузкой для максимально достижимой компенсации реактивной мощности [20]. Существуют также исследования, в которых рассматриваются вопросы проектирования и анализа однофазной коррекции коэффициента мощности (PFC) с использованием однофазного первичного индуктивного преобразователя постоянного тока (SEPIC). В предлагаемой системе применяется каскадный подход, при котором внешний контур реализован с помощью PI-контроллера, настроенного на оптимизацию роя частиц (PSO), для синхронизации выходного напряжения с опорным напряжением, а внутренний контур тока управляется методами фиксированного ШИМ-управления на основе Bang-Bang/PSO [21]. Для гармонического анализа используются различные методы, как традиционные [22, 23], так и методы искусственного интеллекта [24]. А поскольку объекты распределенной генерации (солнечные, ветряные электростанции и т.д.) повсеместно внедряются в нашу жизнь, то также анализируется влияние и смягчение гармоник тока и напряжения в этих системах [25]. Многочисленные исследования были посвящены созданию различных моделей несинусоидального энергопотребления. Например, в [26] были разработаны модели электрических сетей зданий с учетом параметров их основных элементов, характерных электропотребителей и фильтров. В работе [27] предлагается локальная модельная сеть (LAN) для основанного на измерениях моделирования нелинейных совокупных нагрузок энергосистемы, и для проверки метода предоставляются реальные данные полевых измерений. В работе [28] рассмотрен метод, в котором на основе решения системы уравнений получают гармоники тока как функцию гармоник напряжения, наблюдаемых в точке измерения. В работе [29] описан метод получения модели одной или набора нелинейных нагрузок, подключенных к определенной точке электрической сети. Основное предположение заключается в том, что питающая линия электрической сети имеет значительные последовательные сопротивления и испытывает помехи от других параллельных, случайных и неизвестных соседних нагрузок, разделяя часть системы питания с этой линией. Таким образом, для любых моделей, содержащих нелинейные элементы, которые генерируют ВГС, требуются данные реального гармонического анализа, основанные на измерениях в действующих электрических сетях. Это также подтверждается исследованиями в сетях высокого напряжения [30], а также имитационным моделированием этих процессов в сетях низкого напряжения [31].

Возрастание токовой нагрузки за счет появления значительных величин дополнительных симметричных составляющих, обусловленных как основной частотой (в несимметричных режимах), так и иными частотами ВГС (при несинусоидальности трёхфазной системы), приводит к увеличению расхода электрической энергии, большому выделению тепловой энергии за счет дополнительных потерь активной мощности, чревату возникновением пожароопасных ситуаций. В этой связи *целью* статьи является разработка программного обеспечения расчета несбалансированных режимов работы электрических сетей уровня 0,4 кВ, обусловленных несимметрично-несинусоидальным электропотреблением. Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи: 1) рассмотреть методологические аспекты расчета показателей небаланса токов и напряжений, характеризующих обобщенный несбалансированный режим сети 0,4 кВ, обусловленный несимметрично-несинусоидальным электропотреблением; 2) разработать программное обеспечение расчетов несбалансированных режимов; 3) произвести исследование несбалансированных режимов во внутренней электрической сети административного потребителя (на примере ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет имени А. А. Ежевского»).

Результаты исследования

Методологические основы системного подхода к оценке несбалансированных режимов

В соответствии с методом симметричных составляющих Ч. Фортескью любую несимметричную систему (токов, напряжений) можно разложить на три симметричные составляющие, соответственно прямую (positive), обратную (negative) и нулевую (zero) последовательности [32]:

$$\begin{cases} I_A = I_1 + I_2 + I_0; \\ I_B = \underline{a}^2 I_1 + \underline{a} I_2 + I_0; \\ I_C = \underline{a} I_1 + \underline{a}^2 I_2 + I_0; \end{cases} \quad \begin{cases} U_A = U_1 + U_2 + U_0; \\ U_B = \underline{a}^2 U_1 + \underline{a} U_2 + U_0; \\ U_C = \underline{a} U_1 + \underline{a}^2 U_2 + U_0, \end{cases} \quad (1)$$

где I_1 и U_1 – комплексные значения тока и напряжения прямой последовательности основной частоты; I_2 , I_0 , U_2 и U_0 – комплексные значения токов и напряжений обратной и нулевой последовательностей основной частоты напряжения электропитания; \underline{a} – комплексный оператор поворота, равный e^{j120° .

В условиях обобщенного несбалансированного режима системы уравнений (1) будут выглядеть, как

$$\begin{cases} I_A = \Sigma\{(I_1 + \Sigma_4^{40} I_{APS}), (I_2 + \Sigma_2^{38} I_{ANS}), (I_0 + \Sigma_3^{39} I_{AZS})\}; \\ I_B = \underline{a}^2 (I_1 + \Sigma_4^{40} I_{APS}) + \underline{a} (I_2 + \Sigma_2^{38} I_{ANS}) + (I_0 + \Sigma_3^{39} I_{AZS}); \\ I_C = \underline{a} (I_1 + \Sigma_4^{40} I_{APS}) + \underline{a}^2 (I_2 + \Sigma_2^{38} I_{ANS}) + (I_0 + \Sigma_3^{39} I_{AZS}); \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} U_A = \Sigma\{(U_1 + \Sigma_4^{40} U_{APS}), (U_2 + \Sigma_2^{38} U_{ANS}), (U_0 + \Sigma_3^{39} U_{AZS})\}; \\ U_B = \underline{a}^2 (U_1 + \Sigma_4^{40} U_{APS}) + \underline{a} (U_2 + \Sigma_2^{38} U_{ANS}) + (U_0 + \Sigma_3^{39} U_{AZS}); \\ U_C = \underline{a} (U_1 + \Sigma_4^{40} U_{APS}) + \underline{a}^2 (U_2 + \Sigma_2^{38} U_{ANS}) + (U_0 + \Sigma_3^{39} U_{AZS}), \end{cases} \quad (3)$$

где $\Sigma_4^{40} I_{APS}$, $\Sigma_2^{38} I_{ANS}$, $\Sigma_3^{39} I_{AZS}$, $\Sigma_4^{40} U_{APS}$, $\Sigma_2^{38} U_{ANS}$ и $\Sigma_3^{39} U_{AZS}$ – суммарные величины комплексных значений симметричных составляющих, обусловленных совокупностями ВГС токов и на-

пряжений, соответственно дополнительных (additional) прямой (positive), обратной (negative) и нулевой (zero) последовательностей.

Обозначим: $\underline{I}_{1UBM} = \underline{I}_1 + \sum_4^{40} \underline{I}_{APS}$ и $\underline{U}_{1UBM} = \underline{U}_1 + \sum_4^{40} \underline{U}_{APS}$ – комплексные значения тока и напряжения небаланса по прямой последовательности; $\underline{I}_{2UBM} = \underline{I}_2 + \sum_2^{38} \underline{I}_{ANS}$ и $\underline{U}_{2UBM} = \underline{U}_2 + \sum_2^{38} \underline{U}_{ANS}$ – комплексные значения тока и напряжения небаланса по обратной последовательности и $\underline{I}_{0UBM} = \underline{I}_0 + \sum_3^{39} \underline{I}_{AZS}$ и $\underline{U}_{0UBM} = \underline{U}_0 + \sum_3^{39} \underline{U}_{AZS}$ – комплексные значения тока и напряжения небаланса по нулевой последовательности. В этом случае системы уравнений (2) и (3) примут вид:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_{1UBM} + \underline{I}_{2UBM} + \underline{I}_{0UBM}; & \underline{U}_A &= \underline{U}_{1UBM} + \underline{U}_{2UBM} + \underline{U}_{0UBM} \\ \underline{I}_B &= \underline{a}^2 \underline{I}_{1UBM} + \underline{a} \underline{I}_{2UBM} + \underline{I}_{0UBM}; & \underline{U}_B &= \underline{a}^2 \underline{U}_{1UBM} + \underline{a} \underline{U}_{2UBM} + \underline{U}_{0UBM} \\ \underline{I}_C &= \underline{a} \underline{I}_{1UBM} + \underline{a}^2 \underline{I}_{2UBM} + \underline{I}_{0UBM}; & \underline{U}_C &= \underline{a} \underline{U}_{1UBM} + \underline{a}^2 \underline{U}_{2UBM} + \underline{U}_{0UBM}. \end{aligned} \quad (4)$$

Рассмотрим схему замещения трёхфазной четырехпроводной электрической сети, содержащую обобщенную несбалансированную нагрузку (рис. 1).

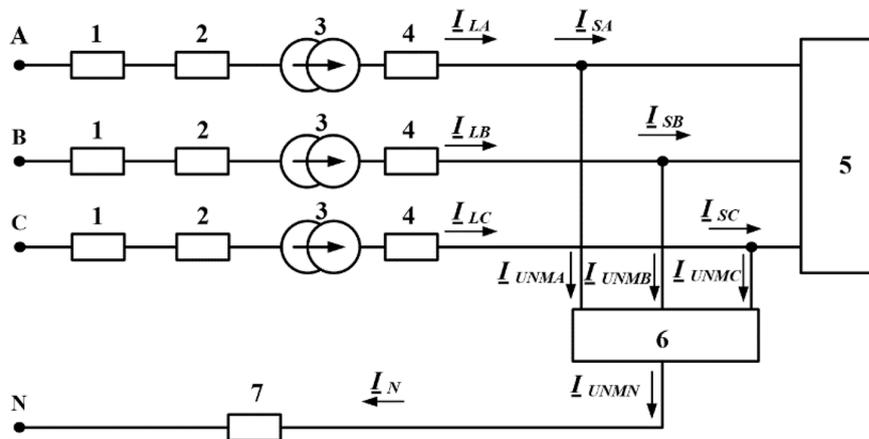


Рис. 1. Схема замещения электрической сети, содержащая несбалансированную нагрузку: 1 – линия 10 кВ; 2 – силовой трансформатор 10/0,4 кВ; 3 – комплексный коэффициент трансформации; 4 – линия 0,4 кВ; 5 – трёхфазная симметричная нагрузка; 6 – трёхфазная объединённая несбалансированная нагрузка; 7 – нейтральный проводник

Fig. 1. Electrical network replacement scheme containing an unbalanced load: 1–10 kV line; 2–10/0.4 kV power transformer; 3 – complex transformation coefficient; 4–0.4 kV line; 5 – three-phase symmetrical load; 6 – three-phase combined unbalanced load; 7 – neutral conductor

Производя дальнейшие преобразования схемы рис. 1 и составляя схему замещения участка электрической сети с трёхфазным несбалансированным источником напряжения (\underline{U}_{1UBM} , \underline{U}_{2UBM} и \underline{U}_{0UBM}), а также соответствующих ей обобщенных схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей для основной фазы («А») уже в симметричной цепи, представим эквивалентные схемы замещения объединённых прямой, обратной и нулевой последовательностей (рис. 2):

Для представленных схем прямой, обратной и нулевой последовательностей (рис. 2) составим по второму закону Кирхгофа следующие уравнения:

$$\frac{I_{H1}^I}{Y_{\Sigma 1}^I} + \underline{U}_{H1}^I = \underline{U}_{\Sigma 1}^I; \quad \frac{I_{H2}^I}{Y_{\Sigma 2}^I} + \underline{U}_{H2}^I = 0 \quad \text{и} \quad \frac{I_{H0}^I}{Y_{\Sigma 0}^I} + \underline{U}_{H0}^I = 0, \quad (5)$$

где $\underline{U}_{\Sigma 1}^I = \frac{Y_1 \cdot \underline{U}_1^I}{Y_1 + Y_{S1}^I}$ – комплексное эквивалентное напряжение прямой последовательности экви-

валентной схемы замещения прямой последовательности; $Y_{\Sigma 1}^I = Y_1 + Y_{S1}^I$; – комплексная эквивалентная проводимость прямой последовательности эквивалентной схемы замещения прямой последовательности; $Y_1 + Y_{S1}^I$ – сумма комплексных проводимостей прямой последовательности электрической сети ($Y_1 = Y_{10(1)} + Y_{10/0.4(1)} + Y_{0.4(1)}$) и трехфазной симметричной нагрузки (Y_{S1}^I); $Y_{\Sigma 2}^I = Y_{\Sigma 1}^I$ – то же самое для обратной последовательности; $Y_{\Sigma 0}^I = Y_0$ ($Y_0 = Y_{10/0.4(0)} + Y_{0.4(0)}$); $I_{H1}^I = I_{1UBM} + I_{S1}^I$, $I_{H2}^I = I_{2UBM} + I_{S2}^I$, $I_{H0}^I = I_{0UBM}$; $\underline{U}_{H1}^I = \underline{U}_{1UBM}$, $\underline{U}_{H2}^I = \underline{U}_{2UBM}$, $\underline{U}_{H0}^I = \underline{U}_{0UBM}$.

Поскольку уравнения (5) содержат 6 неизвестных: I_{H1}^I , I_{H2}^I , I_{H0}^I , \underline{U}_{H1}^I , \underline{U}_{H2}^I и \underline{U}_{H0}^I необходимо составить еще три дополнительных уравнения, связывающих данные шесть величин с учетом исходной схемы (рис. 1) и параметров трёхфазной цепи:

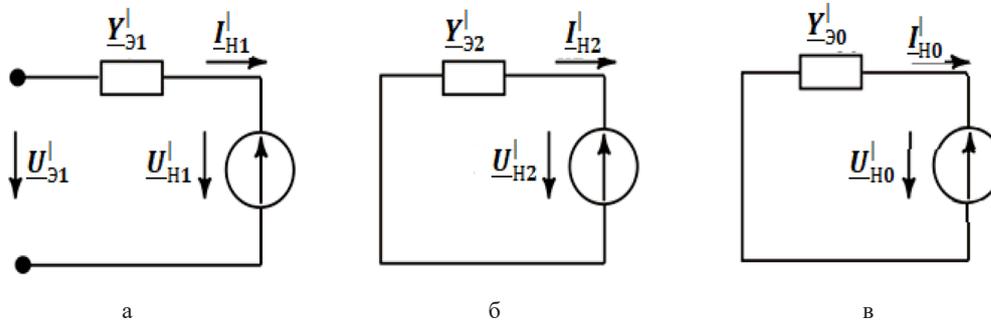


Рис. 2. Эквивалентные схемы объединенных (несимметрия и несинусоидальность) прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей

Fig. 2. Equivalent schemes of combined (non-symmetry and non-sinusoidal) positive (a), negative (b) and zero (c) sequences

$$\underline{U}_{Ha}^I = \frac{I_{Ha}^I}{Y_a}; \quad \underline{U}_{Hb}^I = \frac{I_{Hb}^I}{Y_b}; \quad \underline{U}_{Hc}^I = \frac{I_{Hc}^I}{Y_c}, \quad (6)$$

где $Y_a = y_a \cdot e^{-j\varphi a}$; $Y_b = y_b \cdot e^{-j\varphi b}$; $Y_c = y_c \cdot e^{-j\varphi c}$.

Напряжения и токи в уравнениях (6) выразим через симметричные составляющие:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{H1}^I + \underline{U}_{H2}^I + \underline{U}_{H0}^I &= \frac{1}{Y_a} \cdot (I_{H1}^I + I_{H2}^I + I_{H0}^I); \\ \underline{a}^2 \underline{U}_{H1}^I + \underline{a} \underline{U}_{H2}^I + \underline{U}_{H0}^I &= \frac{1}{Y_a} \cdot (\underline{a}^2 I_{H1}^I + \underline{a} I_{H2}^I + I_{H0}^I); \\ \underline{a} \underline{U}_{H1}^I + \underline{a}^2 \underline{U}_{H2}^I + \underline{U}_{H0}^I &= \frac{1}{Y_c} \cdot (I_{H1}^I + I_{H2}^I + I_{H0}^I); \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Из уравнений (6) определим значения \underline{U}_{H1}^I , \underline{U}_{H2}^I и \underline{U}_{H0}^I и подставим их в систему уравнений (7). После преобразования получим следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} I_{H1}^I \cdot \left(\frac{Y_a + Y_{\Delta 1}^I}{Y_a \cdot Y_{\Delta 1}^I} \right) + I_{H2}^I \cdot \left(\frac{Y_a + Y_{\Delta 2}^I}{Y_a \cdot Y_{\Delta 2}^I} \right) + I_{H0}^I \cdot \left(\frac{Y_a + Y_{\Delta 0}^I}{Y_a \cdot Y_{\Delta 0}^I} \right) &= \underline{U}_{\Delta 1}^I; \\ \underline{a}^2 I_{H1}^I \cdot \left(\frac{Y_b + Y_{\Delta 1}^I}{Y_b \cdot Y_{\Delta 1}^I} \right) + \underline{a} I_{H2}^I \cdot \left(\frac{Y_b + Y_{\Delta 2}^I}{Y_b \cdot Y_{\Delta 2}^I} \right) + I_{H0}^I \cdot \left(\frac{Y_b + Y_{\Delta 0}^I}{Y_b \cdot Y_{\Delta 0}^I} \right) &= \underline{U}_{\Delta 1}^I; \\ \underline{a} I_{H1}^I \cdot \left(\frac{Y_c + Y_{\Delta 1}^I}{Y_c \cdot Y_{\Delta 1}^I} \right) + \underline{a}^2 I_{H2}^I \cdot \left(\frac{Y_c + Y_{\Delta 2}^I}{Y_c \cdot Y_{\Delta 2}^I} \right) + I_{H0}^I \cdot \left(\frac{Y_c + Y_{\Delta 0}^I}{Y_c \cdot Y_{\Delta 0}^I} \right) &= \underline{U}_{\Delta 1}^I. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Решая систему уравнений (8), получаем следующие значения для суммарных симметричных составляющих токов и напряжений в объединенном несбалансированном режиме:

$$I_{H1}^I = \frac{\underline{U}_{\Delta 1}^I \cdot Y_{\Delta 1}^I \cdot (Y_{H1}^3)^I}{(Y_M^3)^I}; I_{H2}^I = \frac{\underline{U}_{\Delta 1}^I \cdot Y_{\Delta 1}^I \cdot Y_{\Delta 2}^I \cdot (Y_K^2)^I}{(Y_M^3)^I}; I_{H0}^I = \frac{\underline{U}_{\Delta 1}^I \cdot Y_{\Delta 1}^I \cdot Y_{\Delta 0}^I \cdot (Y_L^2)^I}{(Y_M^3)^I}; \quad (9)$$

$$\underline{U}_{H1}^I = \frac{\underline{U}_{\Delta 1}^I \cdot (Y_N^3)^I}{(Y_M^3)^I}; \underline{U}_{H2}^I = \frac{\underline{U}_{\Delta 1}^I \cdot Y_{\Delta 1}^I \cdot (Y_K^2)^I}{(Y_M^3)^I}; \underline{U}_{H0}^I = \frac{\underline{U}_{\Delta 1}^I \cdot Y_{\Delta 1}^I \cdot (Y_L^2)^I}{(Y_M^3)^I}. \quad (10)$$

В выражениях (9) и (10)

$$\begin{aligned} \underline{U}_{H1}^I &= \frac{\underline{U}_{\Delta 1}^I \cdot (Y_N^3)^I}{(Y_M^3)^I}; \underline{U}_{H2}^I = \frac{\underline{U}_{\Delta 1}^I \cdot Y_{\Delta 1}^I \cdot (Y_K^2)^I}{(Y_M^3)^I}; \underline{U}_{H0}^I = \frac{\underline{U}_{\Delta 1}^I \cdot Y_{\Delta 1}^I \cdot (Y_L^2)^I}{(Y_M^3)^I}. \\ (Y_M^3)^I &= (Y_{H1}^3)^I + Y_{\Delta 1}^I \cdot (Y_F^2)^I; (Y_{H1}^3)^I = 3 \cdot Y_a Y_b Y_c + Y_{D0}^2 \cdot (Y_{\Delta 2}^I + Y_{\Delta 0}^I) + Y_{\Delta 2}^I Y_{\Delta 0}^I Y_{E0}^I; \\ (Y_F^2)^I &= 3 \cdot Y_{\Delta 2}^I Y_{\Delta 0}^I + Y_{D0}^2 + Y_{E0}^I \cdot (Y_{\Delta 2}^I + Y_{\Delta 0}^I); (Y_L^2)^I = Y_{E2}^I Y_{\Delta 2}^I - (Y_{D1}^2)^I; \\ (Y_N^3)^I &= (Y_{H1}^3)^I - (Y_{H1}^3)^I; (Y_K^2)^I = Y_{\Delta 0}^I Y_{E0}^I - Y_{D2}^2; Y_{D0}^2 = Y_a Y_b + Y_a Y_c + Y_c Y_b; \\ Y_{D1}^2 &= \underline{a} Y_a Y_b + \underline{a}^2 Y_a Y_c + Y_c Y_b; Y_{D0}^2 = \underline{a}^2 Y_a Y_b + \underline{a} Y_a Y_c + Y_c Y_b; \\ Y_{E0}^I &= Y_a + Y_b + Y_c; Y_{E1}^I = \underline{a} Y_a + \underline{a} Y_b + \underline{a}^2 Y_c; \\ Y_{E2}^I &= Y_a + \underline{a}^2 Y_b + \underline{a} Y_c, \end{aligned}$$

где $Y_a = \frac{I_A}{U_A}$, $Y_b = \frac{I_B}{U_B}$ и $Y_c = \frac{I_C}{U_C}$ – комплексные проводимости фаз трёхфазной системы.

Для определения суммарных симметричных составляющих токов в линии 0,4 кВ, обусловленных несбалансированной нагрузкой, определим составляющие токов прямой I_{S1} и обратной I_{S2} последовательностей трёхфазной симметричной нагрузки:

$$I_{S1} = \underline{U}_{H1}^I \cdot Y_{S1}; I_{S2} = \underline{U}_{H2}^I \cdot Y_{S2}. \quad (11)$$

Учитывая выражения (9), (10) и (11), после преобразований определяем симметричные составляющие токов в линии:

$$\left. \begin{aligned} L_{L1} &= I_{H1}^I + I_{S1} = \frac{\underline{U}_{\Delta 1}^I \cdot (Y_Q^4)^I}{(Y_M^3)^I}; \\ L_{L2} &= I_{H2}^I + I_{S2} = \frac{\underline{U}_{\Delta 1}^I \cdot (Y_K^2)^I \cdot Y_{\Delta 2}^I \cdot Y_{\Delta 1}^I}{(Y_M^3)^I}; \\ L_{L0} &= I_{H0}^I = \frac{\underline{U}_{\Delta 1}^I \cdot (Y_K^2)^I \cdot Y_{\Delta 0}^I \cdot Y_{\Delta 1}^I}{(Y_M^3)^I}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где $(Y_Q^4)^I = Y_{\Delta 1}^I \cdot (Y_{H1}^3)^I + (Y_N^3)^I \cdot Y_{P1}^I$.

Определим комплексные показатели несбалансированности токов и напряжений.

Коэффициенты небаланса суммарных прямой, обратной и нулевой последовательностей токов и напряжений объединенной несбалансированной нагрузки определяют как

$$\begin{aligned} \underline{K}_{1iUNB} &= \frac{\Sigma_4^{40} L_{APS}}{I'_{H1}} = \frac{\Sigma_4^{40} L_{APS} \cdot (Y_M^3)'}{U'_{\Theta 1} \cdot Y'_{\Theta 1} \cdot (Y_{H1}^3)'}; & \underline{K}_{2iUNB} &= \frac{I'_{H2}}{I'_{H1}} = \frac{Y'_{\Theta 2} \cdot (Y_K^2)'}{(Y_{H1}^3)'}; \\ \underline{K}'_{0iUBM} &= \frac{I'_{H0}}{I'_{H1}} = \frac{Y'_{\Theta 0} \cdot (Y_L^2)'}{Y_{H1}^3}. \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \underline{K}_{1uUNB} &= \frac{\Sigma_4^{40} U_{APS}}{U'_{H1}} = \frac{\Sigma_4^{40} U_{APS} \cdot (Y_M^3)'}{U'_{\Theta 1} \cdot (Y_N^3)'}; & \underline{K}_{2uUNB} &= \frac{U'_{H2}}{U'_{H1}} = \frac{Y'_{\Theta 1} \cdot (Y_R^2)' \cdot e^{j180^\circ}}{(Y_N^3)'}; \\ \underline{K}'_{0uUNB} &= \frac{U'_{H0}}{U'_{H1}} = \frac{Y'_{\Theta 1} \cdot (Y_L^2)' \cdot e^{j180^\circ}}{Y_N^3}. \end{aligned} \quad (14)$$

Коэффициенты небаланса суммарных прямой, обратной и нулевой последовательностей токов в линии, обусловленных объединенной несбалансированной нагрузкой, определяют как

$$\underline{K}_{1iL} = \frac{(\Sigma_4^{40} L_{APS} + L_{S1})}{I'_{L1}} \quad \underline{K}_{2iL} = \frac{I'_{L2}}{I'_{L1}} = \frac{Y'_{\Theta 1} \cdot (Y_K^2)' \cdot Y_2}{(Y_Q^4)'}; \quad \underline{K}_{0iL} = \frac{I'_{L0}}{I'_{L1}} = \frac{Y'_{\Theta 1} \cdot (Y_L^2)' \cdot Y_0}{(Y_Q^4)'} \quad (15)$$

В выражениях (14): $(Y_Q^4)' = Y'_{\Theta 1} \cdot (Y_{H1}^3)' + (Y_N^3)' \cdot Y_{S1}$, $I'_{L1} = I_{L1}$; $I'_{L2} = I_{L2}$ и $I'_{L0} = I_{L0}$.

В случае отсутствия ответвлений на всем участке линии между источником питания и узлом нагрузки коэффициенты: \underline{K}'_{1iLUBM} , \underline{K}'_{2iLUBM} и \underline{K}'_{0iLUBM} на этом участке неизменны, а коэффициенты: \underline{K}'_{1iUBM} , \underline{K}'_{2iUBM} и \underline{K}'_{0iUBM} будут уменьшаться по мере удаления от узла нагрузки.

Определим эти коэффициенты для любой точки «х» по длине линии. Обозначим через \underline{Y}_{x1} , \underline{Y}_{x2} и \underline{Y}_{x0} комплексные проводимости соответственно прямой, обратной и нулевой последовательностей участка линии от узла нагрузок с СУ до точки «х» этой линии и составим уравнения для схем прямой, обратной и нулевой последовательностей (рис. 2):

$$\underline{U}'_{x1} = \frac{I'_{x1}}{Y_{x1}} + U'_{H1}; \quad \underline{U}'_{x2} = \frac{I'_{x2}}{Y_{x2}} + U'_{H2}; \quad \underline{U}'_{x0} = \frac{I'_{x0}}{Y_{x0}} + U'_{H0}. \quad (16)$$

Подставив в выражения (14) значения величин (15) и (16), после преобразований получим

$$\underline{U}'_{x1} = \frac{U'_{\Theta 1} \cdot (Y_R^4)'}{(Y_M^3)' \cdot Y_{x1}}; \quad \underline{U}'_{x2} = \frac{U'_{\Theta 1} \cdot (Y_K^2)' \cdot Y'_{\Theta 1} \cdot Y_T}{(Y_M^3)' \cdot Y_{x2}}; \quad \underline{U}'_{x0} = \frac{U'_{\Theta 1} \cdot (Y_L^2)' \cdot Y'_{\Theta 1} \cdot Y_U}{(Y_M^3)' \cdot Y_{x0}}, \quad (17)$$

где $(Y_R^4)' = (Y_Q^4)' + Y_{x1} \cdot (Y_N^3)'$; $Y_T = Y_2 - Y_{x2}$; $Y_U = Y_0 - Y_{x0}$.

Определим комплексные коэффициенты небаланса напряжения по суммарным прямой, обратной $(\underline{K}_{2uxUBM})'$ и нулевой $(\underline{K}_{0uxUBM})'$ последовательностям:

$$\begin{aligned} (\underline{K}_{1uxUBM})' &= \frac{\Sigma_4^{40} U_{APS}}{U'_{x1}} = \frac{Y_{x1} \cdot (Y_K^2)' \cdot Y'_{\Theta 1} \cdot Y_T}{(Y_R^4)' \cdot Y_{x2}} \\ (\underline{K}_{2uxUBM})' &= \frac{U'_{x2}}{U'_{x1}} = \frac{Y_{x1} \cdot (Y_K^2)' \cdot Y'_{\Theta 1} \cdot Y_T}{(Y_R^4)' \cdot Y_{x2}}; \\ (\underline{K}_{0uxUBM})' &= \frac{U'_{x0}}{U'_{x1}} = \frac{Y_{x1} \cdot (Y_L^2)' \cdot Y'_{\Theta 1} \cdot Y_U}{(Y_R^4)' \cdot Y_{x0}}. \end{aligned} \quad (18)$$

При отсутствии в узле трёхфазной симметричной нагрузки комплексные проводимости $\underline{Y}_{S1} = \underline{Y}_{S2} = 0$. В этом случае комплексные эквивалентные проводимости для обобщенных

схем прямой и обратной последовательностей, обусловленных несбалансированной нагрузкой (рис. 2а и рис. 2б), останутся без изменений и будут определяться по выражениям

$$\underline{Y}_{\Sigma 1}^{\prime\prime} = \underline{Y}_1; \quad \underline{Y}_{\Sigma 2}^{\prime\prime} = \underline{Y}_2. \quad (19)$$

Комплексная эквивалентная проводимость для схемы нулевой последовательности (рис. 2в) остается без изменений. В ней нужно только заменить $\underline{Y}_{\Sigma 0}$ на $\underline{Y}_{\Sigma 0}^{\prime\prime}$.

Еще к одним показателям качества, характеризующим несбалансированное электропотребление, относятся положительное и отрицательное отклонение фазных напряжений электропитания. Их значения определяются по известным выражениям, установленным ГОСТ 32144–2013 «Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения»:

$$\delta U_{(-)} = \frac{U_n - U_{m(-)}}{U_0} \cdot 100\%; \quad \delta U_{(+)} = \frac{U_n - U_{m(+)}}{U_0} \cdot 100\%, \quad (20)$$

где U_0 – стандартное номинальное напряжение В; $U_{m(-)}$, $U_{m(+)}$ – напряжения электропитания, меньше U_0 и больше U_0 , соответственно, усредненные в интервале 10 мин в соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.30–2013 «Методы измерений показателей качества электрической энергии». В целом можно пользоваться одним выражением для определения установившегося отклонения напряжения:

$$\delta U_{\pm} = \frac{U_{\text{факт.}} - U_0}{U_0} \cdot 100\%,^1 \quad (21)$$

где $U_{\text{факт.}}$ – действительное (фактическое) значение напряжения электропитания в точке контроля качества электроэнергии.

Нормированные значения показателей небаланса напряжений в узле нагрузок, находящемся на расстоянии « l » от шин 0,4 кВ силового трансформатора 10/0,4 кВ, в государственных стандартах отсутствуют. Но для того, чтобы иметь возможность сравнения реальных показателей небаланса напряжения в исследуемой электрической сети с предельно допустимыми значениями, рассмотрим, как эти значения можно получить. Поскольку стандарт [33] устанавливает нормируемые значения для 95 % времени интервала измерения отдельно для несимметричных и несинусоидальных режимов, определим нормы показателей небаланса напряжения исходя из суммы нормируемых значений. То есть нормируемое значение для показателя $K_{1U(n)}$ будет складываться только из суммарного значения совокупностей нормируемых коэффициентов гармонических искажений, составляющих дополнительную прямую последовательность: $K_{1uUBM} = K_{1U(n)} = K_{U(4)} + K_{U(7)} + K_{U(10)} + K_{U(13)} + \dots + K_{U(40)}$. Нормируемое значение для показателя $K_{2U(n)}$ будет складываться из суммарного значения совокупностей нормируемых коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности и коэффициента гармонических искажений, составляющих дополнительную обратную последовательность: $K_{2uUBM} = K_{2U} + K_{U(2)} + K_{U(5)} + K_{U(8)} + K_{U(11)} + \dots + K_{U(38)}$. Нормируемое значение для показателя $K_{0U(n)}$ будет складываться из суммарного значения совокупностей нормируемых

¹ В соответствии с ГОСТ 32144–2013 в точке передачи ЭЭ не должно превышать $\pm 10\%$ от U_0 , а в точке присоединения потребителя к электрической сети общего назначения, в соответствии с ГОСТ 13109–97, не более $\pm 5\%$ от U_0 в 95 % времени 10-минутного интервала измерения в одну неделю, и только в 5 % этого интервала это значение не должно превышать $\pm 10\%$ от U_0 .

коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности и коэффициента гармонических искажений, составляющих дополнительную нулевую последовательность: $K_{0uUBM} = K_{0U} + K_{U(3)} + K_{U(6)} + K_{U(9)} + K_{U(12)} + K_{U(15)} \dots + K_{U(39)}$.

Многочисленными исследованиями установлено [33–37], что наибольшие значения коэффициентов гармонических составляющих для дополнительной прямой последовательности приходятся на долю $K_{U(4)}$, $K_{U(7)}$ и $K_{U(13)}$, для дополнительной обратной – $K_{U(2)}$, $K_{U(5)}$ и $K_{U(11)}$ и для дополнительной нулевой последовательности: $K_{U(3)}$, $K_{U(9)}$ и $K_{U(15)}$. Таким образом, руководствуясь нормами ГОСТ 32144–2013, можем определить предельные значения для показателей небаланса напряжений. Для прямой последовательности

$$K_{1uUBM} = K_{1U(n)} = K_{U(4)} + K_{U(7)} + K_{U(13)} = 1 + 5 + 3 = \mathbf{9} (\%). \quad (22)$$

Для обратной –

$$K_{2uUBM} = K_{2U} + K_{U(2)} + K_{U(5)} + K_{U(11)} = 2 + 2 + 6 + 3,5 = \mathbf{13,5} (\%). \quad (23)$$

Для нулевой последовательности

$$K_{0uUBM} = K_{0U} + K_{U(3)} + K_{U(9)} + K_{U(15)} = 2 + 5 + 1,5 + 0,3 = \mathbf{8,8} (\%). \quad (24)$$

Безусловно, для того чтобы производить сравнение полученных, принятых за «нормируемые», показателей небаланса напряжения с реальными, фактическими значениями этих коэффициентов, сумма исследуемых показателей должна совпадать с суммой «нормируемых».

Стандартом EN 50160:2022 «Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks» устанавливается нормируемое значение показателя THD_U (total harmonics distortion). Его аналогом, устанавливаемым ГОСТ 32144–2013, – суммарным коэффициентом гармонических составляющих напряжения (отношение среднеквадратического значения суммы всех гармонических составляющих до 40-го порядка к среднеквадратическому значению основной составляющей) $K_U, \%$ в точке передачи электрической энергии, т.е.: $K_{U(n)nes.} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} (U_n)^2}}{U_1} \cdot 100\%$.

Устанавливаемое нормируемое значение этого показателя для сети 0,4 кВ в 95 % 10-минутного интервала измерений в неделю составляет 8 %. В реальном несбалансированном режиме работы сети 0,4 кВ расчетное значение подобного коэффициента будет дополняться еще показателями несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности:

$$K_{U(n)UBM} = \frac{\sqrt{U_{2U}^2 + U_{0U}^2 + \sum_{n=2}^{40} (U_n)^2}}{U_1} \cdot 100 \%. \quad (25)$$

За «нормируемое» значение этого показателя можно принимать сумму соответствующих показателей, характеризующих несимметричный и несинусоидальный режимы:

$$K_{U(n)UBM} = K_{2U} + K_{2U} + K_{U(n)nes.} = 2 + 2 + 8 = \mathbf{12} (\%). \quad (26)$$

Таким образом, за норму для критериев оценки несбалансированных режимов по напряжению электропитания (с точки зрения качества электроэнергии) можно принимать полученные значения, определяемые по выражениям: (22), (23), (24), (26).

Но, кроме нормируемых показателей качества по напряжению есть еще ненормируемые показатели по току, в частности, для несимметричных режимов это коэффициенты несимметрии токов по обратной и нулевой последовательностям:

$$\underline{K}_{2iass.} = \frac{I_2}{I_1}, \quad \underline{K}_{0iass.} = \frac{I_0}{I_1},$$

а также коэффициенты несинусоидальности токов по обратной и нулевой последовательностям:

$$\underline{K}_{1iness.} = \frac{\sum_4^{40} I_{APS}}{I_1}, \quad \underline{K}_{2iness.} = \frac{\sum_2^{38} I_{ANS}}{I_1}, \quad \underline{K}_{0iness.} = \frac{\sum_3^{39} I_{AZS}}{I_1}$$

Как уже было сказано, одним из наиболее показательных критериев оценки несимметричных, несинусоидальных и объединенных несбалансированных режимов является коэффициент потерь активной мощности, который представляет собой отношение дополнительных потерь активной мощности, обусловленных несимметричным (несинусоидальным или обобщенным несбалансированным) режимом к соответствующим потерям, вызванных только токами прямой последовательности основной частоты напряжения электропитания [38, 39], то есть

$$\begin{aligned} \underline{K}_{pass.} &= 1 + \underline{K}_{2iass.}^2 + K_r \cdot \underline{K}_{0iass.}^2; \\ \underline{K}_{pness.} &= \underline{K}_{1iness.}^2 + \underline{K}_{2iness.}^2 + K_r \cdot \underline{K}_{0iness.}^2 \\ \underline{K}_{pUBM} &= \underline{K}_{pass.} + \underline{K}_{pness.} \end{aligned} \quad (27)$$

Для машинной обработки результатов измерений параметров электрической энергии в действующих электрических сетях 0,4 кВ разработано программное обеспечение.

Алгоритм и программное обеспечение расчетов несбалансированных режимов в электрических сетях уровня 0,4 кВ

На рис. 3 обозначено следующее: 1 – ввод данных измерений: фазные и междуфазные напряжения, фазные токи, модули напряжений и токов симметричных составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей; 2 – ввод параметров электрической сети: $S_{ном}$ – номинальная мощность силового трансформатора, $P_{хх}$ – потери холостого хода силового трансформатора, $P_{кз}$ – потери короткого замыкания, $U_{кз}$ – напряжение короткого замыкания, i_0 – ток холостого хода, r и x , r_0 и x_0 – удельные активное и индуктивное сопротивления фазного и нейтрального проводников; l – длина линии электропередачи низкого напряжения; \underline{Z}_t и \underline{Z}_{t0} – полные сопротивления прямой (обратной) и нулевой последовательностей силового трансформатора в комплексной форме; \underline{Z}_{lv} – полное комплексное сопротивление линии напряжением 6–10 кВ; 3 – ввод коэффициентов гармонических составляющих токов и напряжений для каждой фазы и углов сдвига фаз между этими гармониками, в соответствии с данными измерений (всего 234 позиции); 4 – вычисление показателей качества и потерь ЭЭ, обусловленных только симметричными составляющими прямой, обратной и нулевой последовательностей фундаментальной частоты; 5 – вычисление показателей качества и потерь ЭЭ, обусловленных только симметричными составляющими дополнительных прямой, обратной и нулевой последовательностей высших гармонических составляющих частоты; 6 – вычисление показателей качества и потерь ЭЭ, обусловленных обобщенным несбалансированным режимом; определение потерь активной мощности, обусловленных перетоками реактивной мощности;

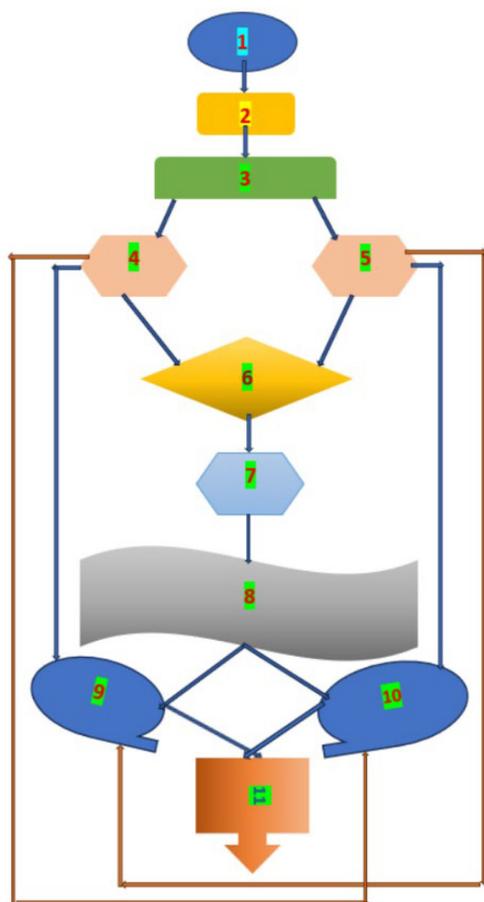


Рис. 3. Структурная блок-схема алгоритма расчета НБ режимов

Fig. 3. Structural block diagram of the algorithm for calculating an UB modes

стили; axes3D – создание 3D-графиков в Matplotlib; os (operating system) – предоставляет функции для взаимодействия с операционной системой. 2. Загружаются исходные данные по параметрам электрической сети (линия высокого напряжения, параметры силового трансформатора, параметры линии низкого напряжения). 3. Вводится алгоритм расчета в соответствии с представленной блок-схемой. 4. Производится расчет показателей без балансирующего устройства. 5. Рассчитываются параметры балансирующего устройства. 6. Производится аналогичный расчет искомых показателей с балансирующим устройством. 7. Полученные результаты сохраняются в Excel-файл. 8. Строятся необходимые графические зависимости.

На рис. 4 представлен фрагмент программы с вводом исходных данных.

Для демонстрации работоспособности программы “Unbalance-6” рассмотрим исследование несбалансированных режимов работы во внутренней электрической сети Иркутского государственного аграрного университета. Исследования производились 09 час. 04.04.2025 г. по 08:50 10.04.2023 г. На шинах вводно-распределительного устройства (ВРУ), находящегоо-

7 – определение параметров балансирующего устройства; 8 – определение исследуемых показателей при включении балансирующего устройства; 9 – графическое отображение исследуемых показателей; 10 – вывод расчетных показателей в виде таблицы Excel; 11 – окончание.

В качестве интерфейса программы используется оболочка “PyCharmMiscProject”. В качестве интерпретатора программы используется программная реализация “Python”. Тип ЭВМ: IBM PC – совместимые ПК. Язык: Среда программирования «Python». ОС: MS Windows 98/2000/XP/Vista/7/10. Объем программы: 25 Кб. Название программы “Unbalance – 6”.

Порядок работы с программой

1. Загружаются следующие библиотеки: scipy.io – для загрузки и сохранения исходных данных при импорте из MATLAB; numPy – используется для всех видов численных и математических операций (массивы и матрицы); pandas – предназначен для анализа данных и работы с табличными структурами dataframe; matplotlib – библиотека для создания 2D-графиков; matplotlib.style – создает определенные

```

class AnalyseurHarmoniques:
    def generer_visualisations_completes(self, dossier_figures='figures_analyse'):
        et_ylabel('Kp, o.e.\nKp, rel. un')
        fig8.savefig(os.path.join(dossier_figures, 'Изменение Kp ez 5V\nKp changing without 50.jpg'), dpi=300, bbox_inches='tight')

        # Figure 9: Autres facteurs de distorsion de tension - TITRES CODE 1 (non présents dans code 2)
        fig9, axes9 = plt.subplots(2, 1, figsize=(12, 8), sharex=True)
        fig9.suptitle('Другие факторы искажения напряжения в зависимости от времени')
        axes9[0].plot(t, np.abs(res['Kbu_mes']), label='Kbu_mes')
        axes9[0].plot(t, np.abs(res['K2u_mes']), label='K2u_mes', color='purple')
        axes9[1].plot(t, res['MK2uv'], label='MK2uv', color='brown')
        axes9[1].plot(t, res['MK0uv'], label='MK0uv', color='magenta')
        for ax in axes9: ax.legend(frameon=True, shadow=True); ax.set_ylabel('Искажение (к)')
        axes9[1].set_xlabel('Время (min)')
        fig9.savefig(os.path.join(dossier_figures, '9_autres_facteurs_distorsion_tension.jpg'), dpi=300,
                    bbox_inches='tight')

        fig05, axes05 = plt.subplots(2, 1, figsize=(12, 8), sharex=True)
        fig05.suptitle('Изменение коэффициентов небаланса до и после подключения 5V\nChange of the unbalance coefficients before and after 50 connected')
        axes05[0].plot(t, np.abs(res['K1umb']), label='K1umb')
        axes05[0].plot(t, np.abs(res['K2umb']), label='K2umb', color='purple')
        axes05[0].plot(t, np.abs(res['K0umb']), label='K0umb', color='blue')
        axes05[1].plot(t, np.abs(res['MK1umb1']), label='MK1umb1')
        axes05[1].plot(t, np.abs(res['MK2umb1']), label='MK2umb1')
        axes05[1].plot(t, np.abs(res['MK0umb1']), label='MK0umb1')
        axes05[0].set_ylabel('Коэффициенты небаланса напряжений (к)\nVoltages unbalance coefficients (k)')
        axes05[0].set_xlabel('Время (min)')
        fig05.savefig(os.path.join(dossier_figures, '9_autres_facteurs_distorsion_tension.jpg'), dpi=300,
                    bbox_inches='tight')

```

Рис. 4. Фрагмент программы “Unbalance – 6” для расчета несбалансированных режимов работы электрических сетей 0,4 кВ

Fig. 4. Fragment of the “Unbalance-6” program for calculating unbalanced operating modes of 0.4 kV electrical networks

ся на расстоянии 100 м от шин 0,4 кВ трансформаторной подстанции ТП 10/0,4 мощностью 400 кВА, был установлен сертифицированный прибор PQM-701 фирмы «Sonel» (рис. 5).

После расшифровки измеренных данных с жесткого диска прибора была произведена загрузка исходных данных в программу “Unbalance-6”.

Результаты анализа расчетных данных

На рис. 6 представлены диаграммы изменения фазных напряжений в исследуемой сети Университета.

Как видно из рис. 6 несбалансированность фазных напряжений выражена не столь явно, поэтому в большей степени судить о характере несбалансированности по напряжению можно на основе анализа коэффициентов небаланса составляющих напряжений по прямой, обратной и нулевой последовательностям. Но для начала рассмотрим, как изменяются ток и напряжение прямой последовательности основной частоты (50 Гц), для того чтобы можно было сравнить процентное соотношение этих показателей со всеми последующими показателями небаланса (рис. 7).

Как видно из анализа рис. 7 усредненные значения тока и напряжения прямой последовательности частоты 50 Гц составляют соответственно 33,1 А и 231,4 В.

На рис. 8 представлены диаграммы изменения коэффициентов небаланса напряжений. Как следует из анализа этого рисунка усредненное значение² коэффициента небаланса напряжения

² Под усредненным значением понимается среднее значение показателя за 1008 десятиминутных промежутков.



Рис. 5. Прибор PQM-701 и его подключение на шинах РУ Университета

Fig. 5. The PQM-701 device and its connection to the DD busbars of the University

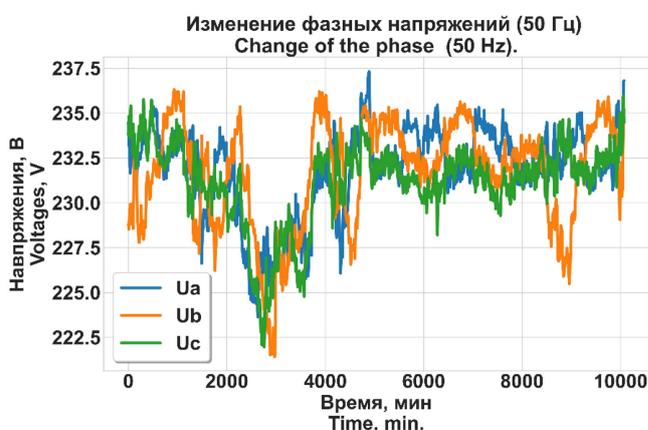


Рис. 6. Изменение фазных напряжений в электрической сети Университета

Fig. 6. Change of phase voltages in the electrical network of the University

Изменение симметричных компонентов тока и напряжения прямой последовательности (50 Гц)
Change of symmetrical current and voltage components of positive sequence (50 Hz).

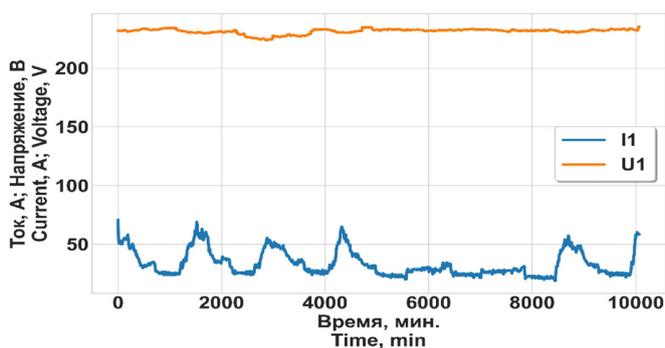


Рис. 7. Изменение тока и напряжения прямой последовательности фундаментальной частоты напряжения электропитания

Fig. 7. Change of the current and voltage of the fundamental frequency positive sequence of the power supply voltage

Изменение суммарных коэффициентов небаланса напряжений
Changing of the total voltages coefficients unbalance

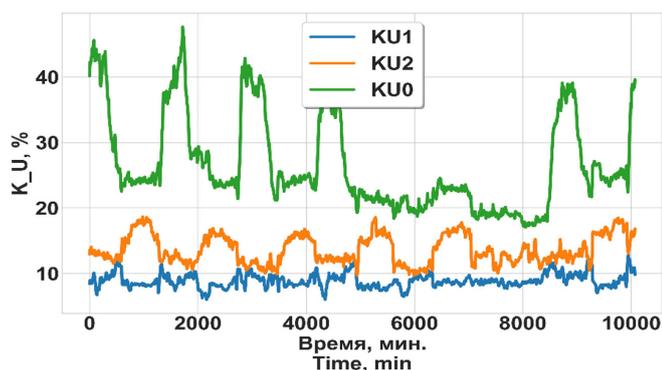


Рис. 8. Изменение суммарных коэффициентов небаланса напряжений по прямой, обратной и нулевой последовательностям в исследуемой электрической сети Университета

Fig. 8. Changes of the total voltage imbalance coefficients in the positive, negative, and zero sequences in the University's electrical network under study

по прямой последовательности (включая значения коэффициента искажений до 40-й гармоники включительно) составило 20,6 % от напряжения U_1 , при этом на долю коэффициентов небаланса напряжения по прямой последовательности, учитывающих только составляющие 4-й, 7-й и 13-й гармоник, приходится 6 % основной частоты, что вполне удовлетворяет полученному «нормированному» значению, определяемому по выражению (22) – до 9 %. Усредненное значение коэффициента небаланса (включая значения коэффициентов до 38-й гармонической составляющей) по обратной последовательности суммарно составляет 38,6 % от U_1 , из которых на долю 2, 5 и 11-й гармоник приходится 9,7 %, что также удовлетворяет полученному значению, принятому в качестве предельного для этой последовательности – выражение (23) – 13,5 %. И усредненное значение коэффициента небаланса напряжения (включая значения коэффициентов до 39-й гармоники) по нулевой последовательности составило 61,2 % напряжения U_1 , из которых на долю 3-й, 9-й и 15-й гармоник приходится 23,2 %, что на 62 % превышает принятое, в соответствии с (24) предельное значение для этого показателя – 8,8 %.

Рассмотрим, как изменяется суммарный коэффициент небаланса напряжения электропитания, определяемый по выражению (24) – рис. 9.

Как показал произведенный анализ рис. 8 усредненное за период измерения значение данного показателя составило 19,5 % от напряжения U_1 , что на 38,5 % больше полученного по выражению (26) значению – 12 %.

В заключение рассмотрим, как изменяются дополнительные потери активной мощности, обусловленные несбалансированным электропотреблением. Как уже было сказано критерием такой оценки может служить коэффициент потерь мощности, определяемый по выражениям (27). Как видно, основными составляющими, входящими в формулу коэффициента потерь, являются коэффициенты, обусловленные действием симметричных составляющих токов обратной и нулевой последовательности основной частоты, а также совокупностями симметричных составляющих токов прямой, обратной и нулевой последовательностей, обусловленных

Изменение суммарного коэффициента небаланса напряжений

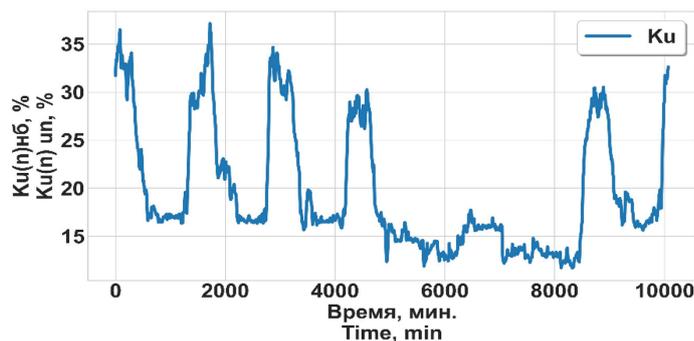


Рис. 9. Изменение суммарного коэффициента небаланса напряжения в исследуемой электрической сети Университета

Fig. 9. Change of the total voltage imbalance coefficient in the studied electrical network of the University

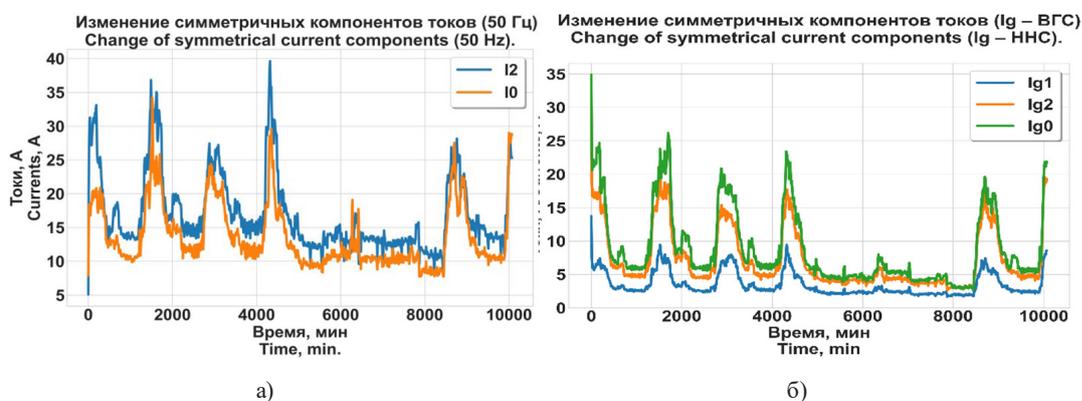


Рис. 10. Диаграммы изменения симметричных составляющих токов обратной и нулевой последовательности частоты 50 Гц (а) и симметричных составляющих токов прямой, обратной и нулевой последовательностей токов ВГС (б)

Fig. 10. Changing diagrams of the currents symmetrical components of the negative and zero sequences of the 50 Hz frequency (a) and the currents symmetrical components of the positive, negative and zero sequences caused by the HNC currents (b)

токами высших гармонических составляющих. На рис. 10 представлены диаграммы изменения указанных симметричных составляющих токов.

Анализ рис. 10 показал, что ток обратной последовательности (I_2) в среднем составляет 51,4% (17А) тока прямой последовательности основной частоты (I_1); ток нулевой последовательности частоты 50 Гц (I_0) – 41 % (13, 6А); суммарный ток прямой последовательности I_{g1} ($\sum_4^{40} I_{APS}$), составляет 10,5 % тока I_1 (3,5 А); ток I_{g2} ($\sum_2^{38} I_{ANS}$) – 21,8 % (7,2 А) и ток I_{g0} ($\sum_3^{39} I_{AZS}$) – 26,6 % тока I_1 (8,8 А). Как видно, токовая нагрузка в несбалансированном режиме, обусловленном несимметрично-несинусоидальным электропотреблением, достаточно значительна, что и приводит к увеличению коэффициента потерь мощности (рис. 11).

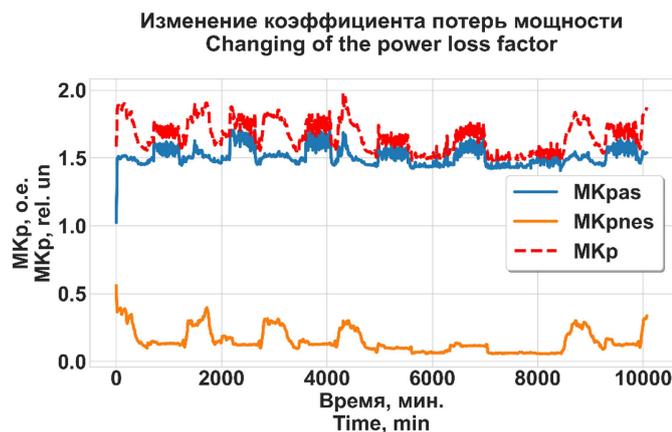


Рис. 11. Изменение коэффициентов потерь мощности при несбалансированном электропотреблении

Fig. 11. Change of the power loss coefficients in case of an unbalanced power consumption

Анализ рис. 11 показывает, что усредненное значение коэффициента потерь мощности, обусловленного несимметрией фазных токов (K_{pas}), превышает «условно сбалансированный режим»³ на 51 %, коэффициент потерь, обусловленный токами ВГС (K_{pnes}), добавляет почти 15 % дополнительных потерь активной мощности. В результате обобщенный коэффициент потерь, характеризующий несбалансированное электропотребление в целом (K_p), характеризует увеличение потерь активной мощности в среднем на 66 % по сравнению с полностью сбалансированным режимом. Безусловно, добиться идеального сбалансированного режима практически невозможно, но, как показывают наши исследования, разработка специализированных балансирующих устройств и их установка в определенной точке электрической сети позволяют добиться снижения коэффициента потерь на 50–85 % [5–9].

Таким образом, подводя итог вышеизложенному, можно сделать следующие выводы:

1. Впервые введено понятие несбалансированного электропотребления, разработан метод расчета показателей небаланса, характеризующих несбалансированные режимы работы низковольтной электрической сети уровня 0,4 кВ.

2. На основе использования нормативов, определенных государственными стандартами для несимметричных и несинусоидальных режимов определены численные значения показателей небаланса, которые можно использовать для сравнения с реальными аналогичными показателями, определяющими уровень небаланса в действующих электрических сетях 0,4 кВ.

3. Разработано программное обеспечение расчета несбалансированных режимов, работоспособность которого продемонстрирована на конкретном примере анализа показателей небаланса в действующей электрической сети 0,4 кВ, питающей административное учреждение.

Список литературы / References

[1] Moreno L. Guide: Understanding Symmetry and Asymmetry in UI Design. Symply, January 6, 2021. [Electronic resource] – Access: https://sympli.io/blog/guide_symmetry_asymmetry_in_ui_design

³ Режим, обусловленный протеканием только токов прямой последовательности основной частоты. В этом случае коэффициент потерь $K_p = 1$.

- [2] Шидловский А.К., Новский В.А., Капличный Н.Н. *Стабилизация параметров электрической энергии в распределительных сетях. Академия наук Украинской ССР, Институт электродинамики*. Киев: Наука. Думка, 1989. 311 с. [Shidlovskiy A.K., Novskiy V.A., Kaplichny N.N. *Stabilization of electric energy parameters in distribution networks. Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, Institute of Electrodynamics*. – К.: Nauka. Dumka, 1989. 311 p. (in Russian)]
- [3] Winter B.O., Engel B. Voltage imbalance resilience and mitigation using grid forming inverters in low-voltage distribution grids, *Conference: 10th Solar & Storage Integration Workshop At: Darmstadt*, Germany, November 2020, 1–8.
- [4] Miroshnyk O., Bałdowska-Witos P., Kruszelnicka W., Kovalyshyn S. Researching and modelling of unbalanced regimes in systems of household electric power consumers. *Journal of Physics Conference Series*, January 2020, 1426(1):012035, 1–8.
- [5] Toubeau J.-F., Bottieau J., Wang Yi, Vallee F. Interpretable Probabilistic Forecasting of Imbalances in Renewable-Dominated Electricity Systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, June 2021, 1–12.
- [6] Dzhuraev S., Beryozkina S., Kamolov M., Safaraliev M., Zicmane I., Nazirov K., Sulonov S. Computation of the zero-wire current under an asymmetric nonlinear load in a distribution network. *Energy Reports*, 2022, 8(8), 563–573.
- [7] Tavarov S.S., Sidorov A.I., Sulonov O.O. Modelling the Operating Mode of the Urban Electrical Network and Developing a Method for Managing These Modes. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 2021, 8(5), 813–818.
- [8] Антонов А.И., Денчик Ю.М., Иванова Е.В., Романов М.Н., Сальников В.Г. Моделирование асимметричных режимов для проектирования электрических сетей. *Российский журнал кибернетики*, 2022, 3(4), 123–129 [Antonov A.I., Denchik Yu.M., Ivanova E.V., Romanov M.N., Salnikov V.G. Modeling of asymmetric modes for designing electrical networks. *Russian Journal of Cybernetics*, 2022, 3(4), 123–129 (in Russian)]
- [9] Бирюлин В.И., Куделина Д.В. Разработка модели для анализа методов снижения асимметрии напряжения в системах электроснабжения. *Энергетика: исследования, оборудование, технологии*, 2022, 24(2), 72–85 [Biryulin V.I., Kudelina D.V. Development of a model for the analysis of methods for reducing voltage asymmetry in power supply systems. *Energy: research, equipment, technology*, 2022, 24(2), 72–85 (in Russian)]
- [10] Shaulemetov T.U. Modeling of asymmetrical operating modes of power autotransformers. *Journal of Academic Research and Trends in Educational Sciences (JARTES)*, 2022, 1(4), 51–66.
- [11] Turdibekov K., Yakubov M., Sulliev A., Sanbetova A. Mathematical Models of Asymmetric Modes in High-Speed Traffic. *XIV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2021”*, Lecture Notes in Networks and Systems, 2021, 247, 1051–1058.
- [12] Berdygozhin A., Campos-Gaona D. Asymmetric Operation of Power Networks, State of the Art, Challenges, and Opportunities. *Energies*, 2024, 17(20), 5021.
- [13] Boghdady T.A., Mohamed Y.A. Reactive power compensation using STATCOM in a PV grid connected system with a modified MPPT method. *Ain Shams Eng.* 2022, xxxx.
- [14] Farhoodnea M, Mohamed A, Shareef H, Zayandehroodi H. Power quality impact of renewable energy-based generators and electric vehicles on distribution systems. *Procedia Technol*, 2013, 11(1), 11–17.

- [15] Kim J-W, Moon G-W. Minimizing effect of input filter capacitor in a digital boundary conduction mode power factor corrector based on time-domain analysis. *IEEE Trans Power Electron*, 2015, 31(5), 3827–3836.
- [16] Cisneros-Magaña R, Medina A, Segundo-Ramírez J. Efficient time domain power quality state estimation using the enhanced numerical differentiation Newton type method. *Int. J Electr Power Energy Syst*, 2014, 63(4), 14–22.
- [17] Qaisar S. M. Time-Domain Identification of the Power Quality Disturbances Based on the Event-Driven Processing. *International Conference on Energy Conservation and Efficiency 2019*, 2019.
- [18] Cisneros-Magaña R., Medina-Rios A., Segundo J. Efficient time domain power quality state estimation using the enhanced numerical differentiation Newton type method. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, 63, 414–422.
- [19] Subbarao M, Babu CS, Satyanarayana S. Design and analysis of variable switching frequency controlled integrated switched mode power converter for class C & class D appliances. *Ain Shams Engineering Journal*, 2018, 9(4), 2849–2858.
- [20] Hamdy S. K. El-Gohareya, Wael M. Mamdouh. On-line analysis of power quality problems in non-sinusoidal/non-linear distribution systems. *Ain Shams Engineering Journal*, 2023, 14, 102266, 1–10.
- [21] Durgadevi S, Umamaheswari MG. Analysis and Design of Single-Phase Power Factor Correction using DC-DC SEPIC Converter with Bang-Bang and PSO based Fixed PWM Techniques. *Energy Procedia*, 2017, 117, 79–86.
- [22] Saini MK, Kapoor R. Classification of power quality events – a review. *Int J Electr Power Energy Syst*, 2012, 43, 11–19.
- [23] Mahela OP, Shaik AG, Gupta N. A critical review of detection and classification of power quality events. *Renew Sustain Energy Rev*, 2015, 41, 495–505.
- [24] Eslami A., Negnevitsky M., Franklin E., Lyden S. Review of AI applications in harmonic analysis in power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 154, 1–26.
- [25] Eroglu H., Cuce E., Cuce P., Gül F., Iskenderoğlu A. Harmonic problems in renewable and sustainable energy systems: A comprehensive review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 48, 101566.
- [26] Шидловский А.К., Жаркин А.Ф. *Высшие гармоники в электрических сетях низкого напряжения*. К.: Научная думка, 2005. 210 с. [Shidlovskiy A. K., Zharkin A. F. *Higher harmonics in low voltage electrical networks*. K.: Nauchnaya dumka, 2005. 210 p. (in Russian)]
- [27] Rouzbehi K., Miranian A. Nonlinear Power System Load Identification Using Local Model Networks. *Power Systems, IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(3), 2872–2881.
- [28] Balcells J, Lamich M, Griful E. Influence of data resolution in nonlinear loads model for harmonics prediction. *Conference: IECON 2016–42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, October 2016, 6560–6565.
- [29] Lamich M., Balcells J., Corbalán M., Griful E. Nonlinear Loads Model for Harmonics Flow Prediction, Using Multivariate Regression. *IEEE Transactions on Industri*, 2017, 64(6), 4820–4827.
- [30] Kovernikova L. I. Results of the research into the harmonics of loads connected to the nodes of high voltage network. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 2014, 12(5), 553–558.

[31] Kovernikova L. I., Luang W. C. Nonlinear load modeling for the analysis of non-sinusoidal states in electrical networks based on measurements of harmonic parameters. *Energy Systems Research*, 2021, 4(3), 5–20.

[32] Furfari F. A., Brittain J. Charles Le Geyt Fortescue and the method of symmetrical components. June 2002 *IEEE Industry Applications Magazine*, 2002, 8(3):7.

[33] Наумов И. В. Технологические предпосылки оценки несбалансированных режимов работы в компонентах низковольтных систем электроснабжения и способы минимизаций последствий этих режимов. *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2024, 17(6), 777–800 [Naumov I. V. Technological prerequisites for assessing unbalanced operating modes in components of low-voltage power supply systems and ways to minimize the consequences of these modes. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2024, 17(6), 777–800 (in Russian)]

[34] Наумов И. В. Программное обеспечение расчетов несбалансированных режимов работы в электрических сетях низкого напряжения. *Энергетик*, 2024, 1, 24–30 [Naumov I. V. Software for calculating unbalanced operating modes in low-voltage electrical networks. *Energetik*, 2024, 1, 24–30 (in Russian)]

[35] Наумов И. В. Устройство для снижения потерь в электрических сетях с нелинейно-несимметричной нагрузкой. *Электричество*, 2023, 6, 57–66. [Naumov I. V. A device for reducing losses in electrical networks with a non-linearly asymmetric load. *Electricity*, 2023, 6, 57–66 (in Russian)]

[36] Наумов И. В., Подъячих С. В., Ямщикова И. В. Снижение пожарной опасности в индивидуальных жилых зданиях при несимметричной и нелинейной нагрузке. *Электричество*, 2025, 4, 53–63 [Naumov I. V., Podyachikh, S.V., Yamshchikova I. V. Reduction of fire danger in individual residential buildings under asymmetric and nonlinear loads. *Electricity*, 2025, 4, 53–63 (in Russian)].

[37] Наумов И. В., Подъячих С. В., Иванов Д. А. Аналитическая оценка изменения качества и потерь электрической энергии в цехах промышленных предприятий. *Промышленная энергетика*, 2025, 9, 19–28 [Naumov I. V., Podyachikh S. V., Ivanov D. A. Analytical assessment of changes in the quality and loss of electrical energy in the workshops of industrial enterprises. *Industrial Energy*, 2025, 9, 19–28 (in Russian)]

[38] Косоухов Ф. Д. *Энергосбережение в низковольтных электрических сетях при несимметричной нагрузке*. Санкт-Петербург-Москва-Краснодар, 2016. 280 с. [Kosoukhov F.D. *Energy saving in low-voltage electric networks with an asymmetric load*. St. Petersburg-Moscow-Krasnodar, 2016. 280 p. (in Russian)]

[39] Косоухов Ф. Д. *Методы расчета и анализа показателей несимметрии токов и напряжений в сельских распределительных сетях*. Л.: ЛСХИ. 1984. 42 с. [Kosoukhov F.D. *Methods of calculation and analysis of current and voltage asymmetry indicators in rural distribution networks*. L.: LSHI. 1984. 42 p. (in Russian)]

EDN: WEXZQP

УДК 623.462.7

Method for Identifying Simulated Interference in a Pulse – Doppler Active Radar Homing Head of an Air-to-Air Missile When It Is Aimed at a Helicopter

Oleg V. Vasiliev^a,

Alexander A. Kuchin^b, Kirill V. Parfenov^{b*},

Irina A. Savelieva^b and Andrey A. Philonov^b

^aScientific and Production Association NaukaSoft

Moscow, Russian Federation

^bMilitary Academy of Aerospace Defense

named after Marshal of the Soviet Union G. K. Zhukov

Tver, Russian Federation

Received 14.07.2025, received in revised form 26.01.2026, accepted 28.01.2026

Abstract. In the article, using the example of the homing of the air-to-air missile with an active radar homing head (ARHH) on a helicopter when it is set up with interference that leads away in range and speed, a method for identifying them is studied based on the low flight altitude and the characteristics of the reflected radar signal from the advancing blades of the helicopter's main rotor. Based on the results of the modeling, the possibility of setting thresholds for identifying the impact or lack of impact on the air-to-air missile's ARHH of interference leading in range and speed in all their combinations has been established. The implementation of the proposed approach will allow the timely application of jamming protection measures in the air-to-air missile and thereby reduce the final miss.

Keywords: air-to-air missile, helicopter, range and speed diverting interference, calculated range, energy center of the blade.

Citation: Vasiliev O. V., Kuchin A. A., Parfenov K. V., Savelieva I. A. and Philonov A. A. Method for Identifying Simulated Interference in a Pulse – Doppler Active Radar Homing Head of an Air-to-Air Missile When It Is Aimed at a Helicopter. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(2), 260–271. EDN: WEXZQP



© Siberian Federal University. All rights reserved

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

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

Способ идентификации имитационных помех в импульсно-доплеровской активной радиолокационной головке самонаведения ракеты «воздух-воздух» при ее наведении на вертолет

О. В. Васильев^а, А. А. Кучин^б,
К. В. Парфенов^б, И. А. Савельева^б, А. А. Филонов^б

^аНПО НаукаСофт

Российская Федерация, Москва

^бВоенная академия воздушно-космической обороны
им. Маршала Советского Союза Г. К. Жукова

Российская Федерация, Тверь

Аннотация. В статье на примере самонаведения ракеты «воздух-воздух» с активной радиолокационной головкой самонаведения (АРГС) на вертолет при постановке им уводящих по дальности и скорости помех исследован способ их идентификации на основе маловысотности полета и особенностей отраженного радиолокационного сигнала от наступающих лопастей несущего винта вертолета. На основе результатов моделирования установлена возможность выставления порогов для идентификации воздействия или отсутствия воздействия на АРГС ракеты «воздух-воздух», уводящих по дальности и скорости помех во всех их комбинациях. Реализация предложенного подхода позволит своевременно применить в ракете «воздух-воздух» средства помехозащиты и тем самым снизить конечный промах.

Ключевые слова: ракета «воздух-воздух», вертолет, идентификация уводящих по дальности и скорости помех, вычисленная дальность, энергетический центр лопасти.

Цитирование: Васильев О. В. Способ идентификации имитационных помех в импульсно-доплеровской активной радиолокационной головке самонаведения ракеты «воздух-воздух» при ее наведении на вертолет / О. В. Васильев, А. А. Кучин, К. В. Парфенов, И. А. Савельева, А. А. Филонов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(2). С. 260–271. EDN: WEXZQP

Введение

Опыт современных боевых действий показал, что вертолеты являются мощным средством борьбы с артиллерией, бронетанковой и автотранспортной техникой [1].

Применение авиационной управляемой ракеты «воздух-воздух» с активной радиолокационной головкой самонаведения (АРГС), построенной по импульсно-доплеровскому принципу обработки в ней отраженных от воздушных целей радиолокационных сигналов, позволит выполнять атаку вертолета по принципу «пустил – забыл» [1].

В свою очередь, применение вертолетов военного назначения в современных условиях предполагает некоторые особенности, которые затрудняют противодействие такому классу целей с помощью управляемых ракет «воздух–воздух» с АРГС. Это обусловлено следующими факторами.

Во-первых, маловысотность полета вертолета затрудняет измерение параметров его полета в АРГС ракеты «воздух-воздух», так как подстилающая поверхность вызывает мощные отражения радиолокационного сигнала. Помимо этого, маловысотность является причиной

возникновения пассивной помехи, типа «антипод», когда в АРГС возникает двойник вертолета, который как будто летит под землей, на глубине, равной высоте полета вертолета [2].

Во-вторых, вертолет способен зависнуть в воздухе, что также усложняет измерение параметров его положения в пространстве и может привести к срыву его сопровождения в АРГС ракеты [3].

В-третьих, вертолет способен очень быстро менять направление своего полета, в том числе способен осуществлять разворот, зависнув в пространстве, и после этого начать полет в другом направлении, что значительно усложняет самонаведение ракеты на него [4].

В-четвертых, современная армейская авиация оснащается бортовыми комплексами обороны со станциями активных помех (аппаратурой радиоэлектронной борьбы) и способна ставить преднамеренные помехи различного характера. Одним из видов преднамеренных помех являются имитирующие помехи, к которым относятся уводящие по дальности и скорости [5].

Увод по дальности и скорости достигается ретрансляцией принятого от АРГС ракеты радиолокационного сигнала с постепенным изменением времени задержки t_z этого сигнала или его доплеровской частоты F_d для подавляемой АРГС [6]. При этом условиями эффективного увода от истинной цели являются:

- когерентность помех, т.е. ошибка запоминания несущей частоты в передатчике помех не должна превышать половину ширины узкополосного доплеровского фильтра приемного устройства АРГС ракеты;
- «плавность» увода – спектр закона увода должен находиться в пределах полосы пропускания следящей системы;
- мощность помехи в начале увода должна в 2...3 раза превышать мощность полезного сигнала на входе приемного устройства АРГС ракеты [7].

Уводящие по дальности и скорости помехи приводят к значительному искажению оценок дальности и скорости в системах автосопровождения по дальности (АСД) и скорости (АСС) в АРГС ракеты «воздух–воздух». Конечной целью постановки такого вида помех является срыв автосопровождения по направлению (АСН). Это достигается тем, что по окончании цикла увода постановщик помех переходит в режим «молчания», происходит срыв автосопровождения не только в системе АСД или АСС, но и в системе АСН, после чего АРГС ракеты переходит в режим поиска цели [8].

Одной из задач функционирования АРГС ракеты является анализ помеховой обстановки и при необходимости включение тех или иных средств помехозащиты [9].

Таким образом, в условиях воздействия на импульсно-доплеровскую АРГС ракеты «воздух-воздух» уводящих по дальности и скорости помех необходимо принимать дополнительные меры помехозащиты в целях минимизации промаха ракеты при ее самонаведении на вертолет. В интересах повышения эффективности помехозащиты АРГС самонаводящейся ракеты необходимо предварительно осуществлять идентификацию воздействия уводящих по дальности и скорости помех.

Идентификация уводящих помех по дальности

В данной работе при решении вопроса идентификации уводящих по дальности и скорости помех в АРГС ракеты «воздух-воздух» рассматривается наведение на вертолет в вертикальной плоскости.

Как правило, для идентификации уводящих по дальности и скорости помех в АРГС ракеты происходит сравнение измерений, полученных из скоростного канала, и производных измерений, полученных из дальномерного канала. Далее с порогом ε_1 сравнивается модуль разности показателей производных измерений дальности «ракета-вертолет» \dot{D}_u из дальномерного канала АРГС ракеты и доплеровской частоты F_ϕ , обусловленной скоростью сближения ракеты с фюзеляжем вертолета, из скоростного канала АРГС ракеты в соответствии с выражением

$$\left| \dot{D}_u - \frac{\lambda F_\phi}{2} \right| \leq \varepsilon_1, \quad (1)$$

где λ – длина волны зондирующего радиолокационного сигнала АРГС.

Невыполнение условия (1) говорит о воздействии на ракету «воздух–воздух» уводящих по дальности и скорости помех, но неизвестно, каких именно, поэтому требуется дополнительная идентификация уводящих по дальности и скорости помех.

В системе автономных датчиков ракеты «воздух-воздух» при помощи гироскопов и акселерометров, а также информации, загруженной в ракету перед пуском, из информационно-вычислительной системы летального аппарата, с которого был произведен пуск, на основе оценок параметров полета ракеты может вычисляться ее высота полета относительно земной поверхности H_p .

Чтобы вычислить дальность предлагаемым способом, необходимо найти первое пересечение прямой от АРГС ракеты до земной поверхности в направлении на вертолет. Таким образом, необходимо в уравнение окружности подставить уравнение прямой и найти ближайшую точку пересечения прямой с окружностью, эквивалентный радиус Земли $R_{э\text{кв}}$ при этом равен 8500 км [10]. В этих целях нужно задать систему координат в вертикальной плоскости (в данной работе центр Земли будет иметь координату по оси абсцисс $x = 0$, а по оси ординат $y = 0$). Помимо этого необходимо знать высоту H_p и угол места вертолета ε_{ym} , измеряемый антенной системой АРГС (угол наклона линии визирования в направлении на вертолет относительно горизонтальной плоскости) [11].

Линейное уравнение, описывающее прямую от АРГС ракеты через земную поверхность в направлении на вертолет, имеет вид:

$$y = \operatorname{tg}(\varepsilon_{ym})x + R_{э\text{кв}} + H_p. \quad (2)$$

В свою очередь, уравнение описывающее окружность Земли, имеет вид:

$$y^2 + x^2 = R_{э\text{кв}}^2. \quad (3)$$

Для того чтобы найти точки пересечения прямой от АРГС ракеты с земной поверхностью, необходимо подставить выражение (2) в выражение (3) вместо y , тогда выражение (3) примет вид:

$$(\operatorname{tg}(\varepsilon_{ym})x + R_{э\text{кв}} + H_p)^2 + x^2 = R_{э\text{кв}}^2. \quad (4)$$

После преобразования уравнение (4) примет вид

$$(\operatorname{tg}^2(\varepsilon_{ym})x^2 + 2\operatorname{tg}(\varepsilon_{ym})x(R_{э\text{кв}} + H_p) + (R_{э\text{кв}} + H_p)^2 + x^2 = R_{э\text{кв}}^2. \quad (5)$$

После элементарных математических преобразований выражение (5) примет вид

$$2tg^2(\varepsilon_{ym})x^2 + 2tg(\varepsilon_{ym})(R_{экс} + H_p)x + (R_{экс} + H_p)^2 - R_{экс}^2 = 0. \quad (6)$$

После решения уравнения (6) необходимо найти корень x_j из полученных, соответствующий координате x_b первого пересечения прямой от АРГС ракеты с земной поверхностью в направлении на вертолет по правилу

$$x_b = \min x_j,$$

где $j = 1, 2$; j – количество корней уравнения (6).

После отыскания x_b необходимо решить равенство (2), подставив туда x_b вместо x , для отыскания координаты y_b , соответствующей первому пересечению прямой от АРГС ракеты с земной поверхностью в направлении на вертолет. Тогда вычисление равенства (2) можно произвести в соответствии с выражением

$$y_b = tg(\varepsilon_{ym})x_b + R_{экс} + H_p.$$

Теперь вычисление дальности от АРГС ракеты до земной поверхности в направлении на вертолет D_b можно произвести в соответствии с выражением

$$D_b = \sqrt{x_b^2 + (y_b - R_{экс} - H_p)^2}. \quad (7)$$

Ошибку ΔD вычисленной дальности D_b по отношению к измеренной дальности $D_{из}$ классическим способом можно оценить по геометрическим соображениям, зная высоту полета вертолета H_b в соответствии с выражением

$$\Delta D = \frac{H_b}{\sin(\varepsilon_{ym})}.$$

В дальности D_b , вычисленной по соотношению (6), отсутствует зависимость от времени задержки t_3 отраженного от вертолета радиолокационного сигнала, таким образом, постановка вертолетом уводящих помех по дальности не будет оказывать на нее никакого влияния. Вычисление дальности D_b графически поясняется на рис. 1.

В зависимости от собственной высоты вертолета над земной поверхностью вычисленная дальность D_b имеет незначительные расхождения от измеренной классическим способом дальности $D_{из}$ (рис. 1) в дальномерном канале АРГС ракеты по соотношению

$$D_{из} = \frac{ct_3}{2},$$

где c – скорость света.

Произведены расчеты геометрической ошибки ΔD вычисленной дальности D_b в зависимости от угла места вертолета ε_{ym} на высотах полета вертолета $H_p = 50, 100$ и 200 м при имеющихся измерениях дальности $D_{из}$ «ракета-вертолет» при условиях отсутствия воздействия на АРГС ракеты «воздух-воздух» уводящих по дальности и скорости помех и постоянной высоты полета ракеты $H_p = 6000$ м. Результаты представлены в табл. 1.

Таким образом, малая высота полета вертолета вносит незначительную ошибку в значение вычисленной в соответствии с соотношением (6) дальности D_b .

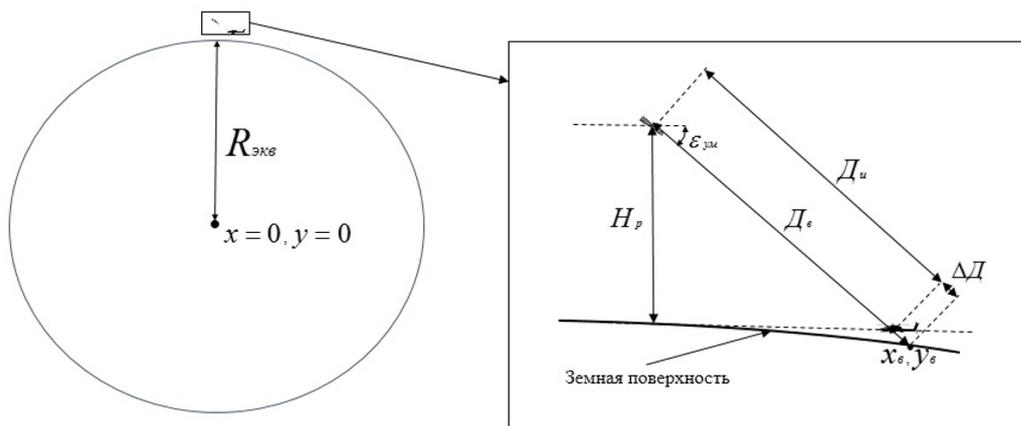


Рис. 1. Вычисленная и измеренная дальность до вертолета

Fig. 1. Calculated and measured range

Таблица 1. Геометрическая ошибка вычисленной дальности ΔD

Table 1. Geometric error of the calculated range ΔD

$H_{\theta} = 50 \text{ м}$			
$\epsilon_{ум}$ [град]	$D_{и}$ [М]	$D_{в}$ [М]	ΔD [М]
20	17443,62	17589,82	146,2
25	14102,02	14220,33	118,31
30	11912,73	12012,73	100
35	10381,05	10468,22	87,17
40	9261,23	9339,03	77,8
45	8417,56	8488,28	70,72
50	7769,12	7834,39	65,27
$H_{\theta} = 100 \text{ м}$			
20	17297,43	17589,82	292,39
25	13983,71	14220,33	236,62
30	11812,73	12012,73	200
35	10293,88	10468,22	174,34
40	9183,45	9339,03	155,58
45	8346,86	8488,28	141,42
50	7703,85	7834,39	130,54
$H_{\theta} = 200 \text{ м}$			
20	17005,05	17589,82	584,77
25	13747,09	14220,33	473,24
30	11612,73	12012,73	400
35	10119,53	10468,22	348,69
40	9027,88	9339,03	311,15
45	8205,43	8488,28	282,85
50	7573,31	7834,39	261,08

Типовыми параметрами уводящей по дальности помехи являются длительность увода t_y от 0,5 до 20 с и максимальное уводящее время задержки Δt_z от 1 до 30 мкс ($\Delta D_{из} = 150 \dots 4500$ м), закон увода линейный или параболический.

Произведены расчеты дальностей $D_{в}$ и $D_{из}$ в условиях постановки вертолетом уводящей помехи по дальности по линейному (рис. 2) и параболическому (рис. 3) закону увода, с временем увода $t_y = 10$ с и максимальным искажением измеренной дальности $\Delta D_{из} = 4500$ м

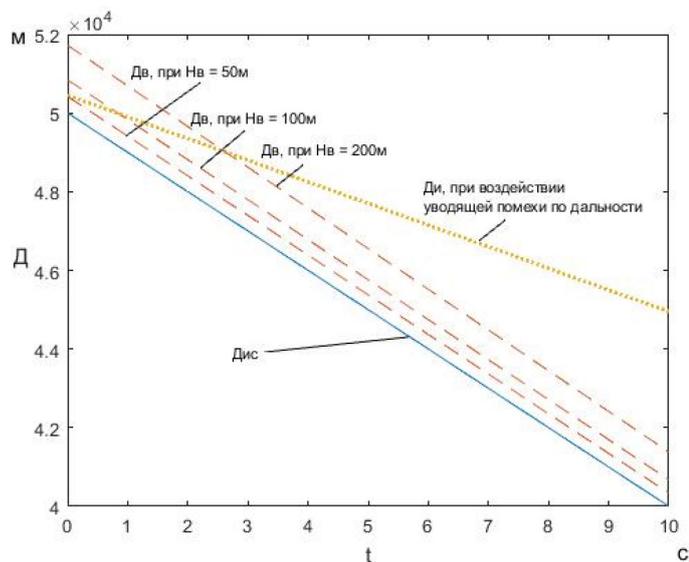


Рис. 2. Истинная, измеренная и вычисленная дальности при линейном законе увода по дальности

Fig. 2. True, measured and calculated ranges under linear drift law

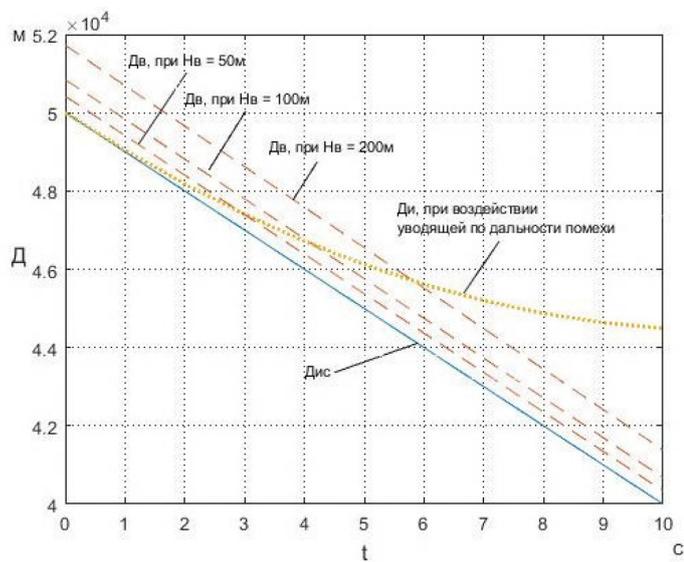


Рис. 3. Истинная, измеренная и вычисленная дальности при параболическом законе увода по дальности

Fig. 3. True, measured and calculated ranges under parabolic drift law

($\Delta t_3 = 30$ мкс), на высотах полета вертолета $H_p = 50, 100$ и 200 м, с изменением истинной дальности «ракета-вертолет» $D_{ис}$ с 50000 до 40000 м за 10 сек, с постоянной высотой полета ракеты $H_p = 6000$ м.

Проанализировав данные, представленные на рис. 2 и 3, можно сделать вывод, что вычисленная дальность D_v меняется по определенному закону, в зависимости от характера полета вертолета, а в случае маневра вертолета будет почти совпадать с истинной дальностью $D_{ис}$ ввиду малых скоростей полета вертолета и его возможностей по набору и снижению высоты, поэтому представляется возможность провести идентификацию уводящей помехи по дальности путем установления порога ε_2 для модуля разности вычисленной D_v и измеренной $D_{ис}$ дальностей в соответствии с выражением

$$|D_v - D_{ис}| \leq \varepsilon_2. \quad (8)$$

Идентификация уводящих помех по скорости

Уводящие по скорости помехи, в свою очередь, могут ставиться совместно с уводящими по дальности и быть с ними функционально взаимосвязанными, функционально независимыми, либо ставиться отдельно, независимо от уводящих помех по дальности. В случае постановки уводящих по скорости помех искажается доплеровская частота, обусловленная сближением ракеты с фюзеляжем вертолета F_ϕ , по аналогичным соображениям, приведенным для искажения времени задержки t_3 .

Однако в таком случае после процедуры быстрого преобразования Фурье (БПФ) в амплитудно–частотном спектре отраженного от вертолета сигнала $S(f)$ возможно вычисление доплеровской частоты, обусловленной сближением ракеты и энергетического центра вращающихся лопастей несущего винта вертолета F_n (рис. 4) по соотношению

$$F_n = \frac{M\{A_i F_i\}}{M\{A_i\}},$$

где $M\{\dots\}$ – операция математического ожидания; F_i и A_i – соответственно i -я доплеровская частота и амплитуда спектральной составляющей, соответствующая отражениям РЛ сигнала от наступающей лопасти несущего винта вертолета; $i = 1, \dots, I$; I – общее количество доплеровских частот и амплитуд спектральных составляющих, соответствующих отражениям радиолокационного сигнала от наступающей лопасти несущего винта вертолета [12].

Доплеровская частота F_n , обусловленная сближением ракеты и энергетического центра наступающих лопастей, не подвержена влиянию уводящих по скорости помех в отличие от фюзеляжной компоненты F_ϕ . Воздействие уводящей по скорости помехи с временем увода $t_y = 4$ с, изменением истинной доплеровской частоты, обусловленной сближением ракеты «воздух–воздух» с фюзеляжем вертолета $F_{\phi и}$ с 62000 до 59500 Гц, и искажением доплеровской частоты $\Delta F_\phi = 6500$ Гц (в случае, если $\lambda = 0.03$ м, искажение радиальной скорости вертолета $\Delta V_v = 97.5$ м/с) показано на рис. 5, где t_1 – момент начала постановки уводящей по скорости помехи вертолетом, в этот момент в скоростном канале АРГС автосопровождение F_ϕ сбрасывается и АРГС перехватывает уводящую по скорости помеху, при этом F_n меняется почти пропорционально F_ϕ [13].

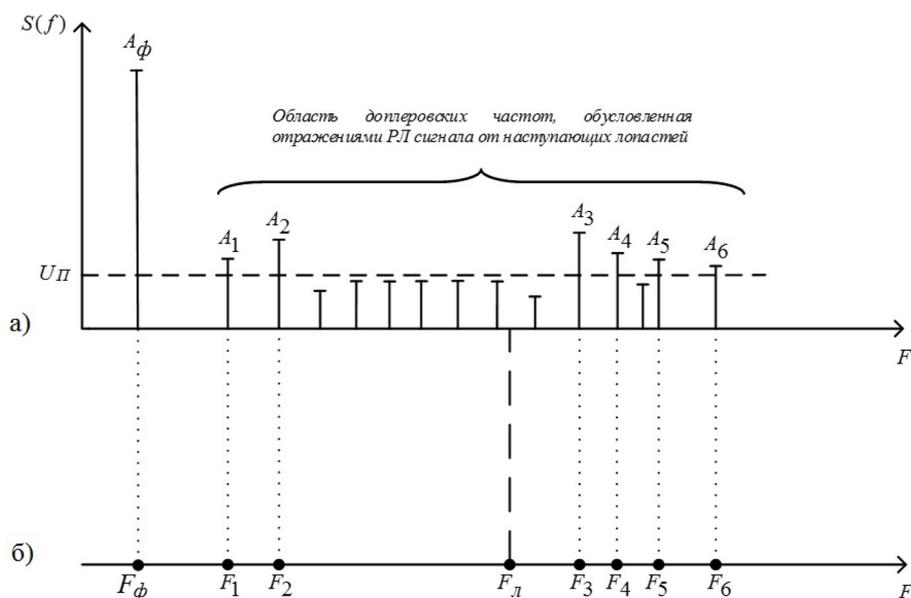


Рис. 4. Определение энергетического центра лопастей

Fig. 4. Determination of the energy center of the blades

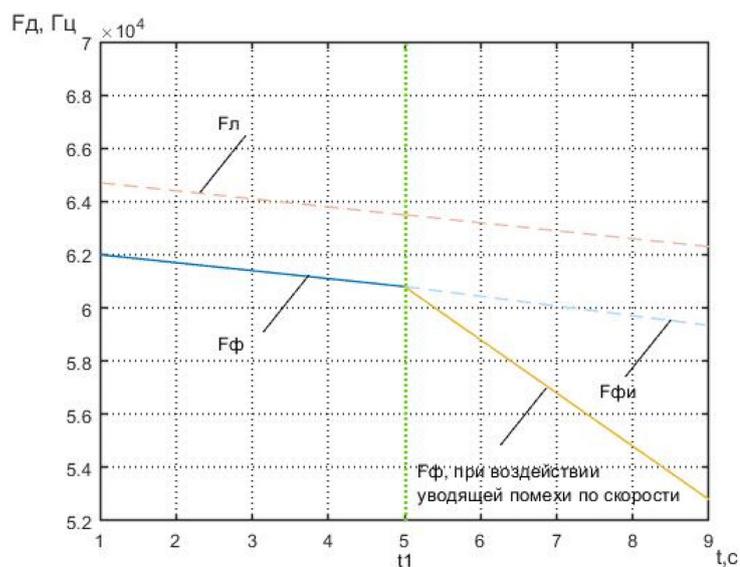


Рис. 5. Воздействие уводящей по скорости помехи на $F_{\text{л}}$

Fig. 5. The effect of the speed-destroying interference on $F_{\text{л}}$

Проанализировав рис. 5, можно сделать вывод, что параллельность изменения и небольшие различия $F_{\text{л}}$ и $F_{\text{ф}}$ позволяют идентифицировать уводящую помеху по скорости, выставив порог ε_3 для разности производных доплеровских частот $\dot{F}_{\text{л}}$ и $\dot{F}_{\text{ф}}$ по модулю в соответствии с выражением

$$|\dot{F}_{\text{л}} - \dot{F}_{\text{ф}}| \leq \varepsilon_3. \tag{9}$$

Таблица 2. Идентификация уводящих по дальности и скорости помех

Table 2. Identification of diverting interference by range and speed

Условие	Результат выполнения условий			
	Помех нет	Уводящая помеха по дальности	Уводящая помеха по скорости	Уводящие помехи по дальности и скорости одновременно
$\left D_n - \frac{\lambda F_\phi}{2} \right \leq \varepsilon_1$	«Да»	«Да»	«Да»	«Нет»
$ D_n - D_n \leq \varepsilon_2$	«Да»	«Нет»	«Да»	«Нет»
$ \dot{F}_n - \dot{F}_\phi \leq \varepsilon_3$	«Да»	«Да»	«Нет»	«Нет»

По соотношениям (1), (8) и (9) можно выявить воздействие или отсутствие воздействия уводящих по дальности и скорости помех на импульсно-доплеровскую АРГС ракеты «воздух–воздух» в различных их комбинациях (табл. 2).

Заключение

Таким образом, в импульсно-доплеровской АРГС ракеты «воздух–воздух» возможна идентификация различных комбинаций воздействия или отсутствия воздействия на нее уводящих по дальности и скорости помех вышеприведенным способом, что позволит использовать результаты идентификации в алгоритме информационного обеспечения ракеты в качестве средства помехозащиты и повысить точность самонаведения ракеты на вертолет.

Список литературы / References

[1] Богданов А. В., Горбунов С. А., Кучин А. А., Хадур А. А. Алгоритм наведения управляемой ракеты класса «воздух–воздух» с активной радиолокационной головкой самонаведения на вертолет при различном характере его полета. *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2020, 13(7), 829–842 [Bogdanov A. V., Gorbunov S. A., Kuchin A. A., Hadur A. A. Guidance algorithm for an air-to-air guided missile with an active radar homing head on a helicopter under different flight conditions. *Sib. Fed. Univ. Eng. Technol.* 2020, 13(7), 829–842 (in Russian)]

[2] Леньшин А. В. *Бортовые комплексы радиоэлектронной борьбы*. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2016. 508 с. [Lenshin A. V. *Onboard electronic warfare systems*. Voronezh: Military training center of air force «Air force academy», 2016. 508 p. (in Russian)]

[3] Богданов А. В., Горбунов С. А., Кучин А. А., Шпортко С. А. Точностные и вероятностные характеристики алгоритма распознавания режима полета вертолётa в радиолокационной системе воздушного базирования. *Журнал СФУ. Техника и технологии*. 2018. Т. 11. № 3. С. 358–370 [Bogdanov A. V., Gorbunov S. A., Kuchin A. A., Shportko S. A. Accuracy and probability characteristics of the algorithm for recognizing the flight mode of a helicopter in airborne radar system. *Sib. Fed. Univ. Eng. Technol.*, 2018 11(3). 358–370 (in Russian)]

[4] Богданов А. В., Гамов М. В., Горбунов С. А., Кучин А. А., Лобанов А. А., Филонова П. А. Математическая модель наведения ракеты класса «воздух–воздух» на воздушную цель класса «вертолет» при стационарном режиме его полета. *Вестник Тверского государственного университета*. 2018. Т. 24. № 1. С. 10–15 [Bogdanov A. V., Gammov M. V., Gorbunov S. A., Kuchin A. A., Lobanov A. A., Filonova P. A. Mathematical model of the guidance of an air-to-air missile to an air target class «helicopter» in stationary mode of its flight. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2018. T. 24. No. 1. P. 10–15 (in Russian)]

ного университета. Серия: Прикладная математика. 2019. № 4(55). 88–97 [Bogdanov. A.V., Gamov M. V., Gorbunov S. A., Kuchin A. A., Lobanov A. A., Philonova P. A. Mathematical model of air-to-air missile guidance to a helicopter-class aerial target during its stationary flight mode. *Bulletin of Tver State University. Series: applied mathematics*. 2019. № 4(55). 88–97 (in Russian)]

[5] Куприянов А.И., Шустов Л.Н. *Радиоэлектронная борьба. Основы теории*. М.: Вузовская книга, 2011. 800 с. [Kupriyanov A. I., Shustov L. N. *Electronic warfare. Fundamentals of theory*. Moscow: University book, 2011. 800 p. (in Russian)]

[6] *Метод повышения помехозащищённости бортовой радиолокационной станции истребителя*: монография / Богданов А. В., Закомолдин Д. В., Лютиков И. В., Бондарев В. Н., Кочетов И. В., Федотов А. Ю., Докучаев Я. С., Черваков В. О. Красноярск: СФУ, 2018. 182 с. [*Method for increasing the noise immunity of a fighter's onboard radar* / Bogdanov A. V., Zakomoldin D. V., Chervakov V. O. etc. Krasnoyarsk: SFU, 2018. 182 p. (in Russian)]

[7] Козлов С. В. *Методы и средства радиоэлектронной защиты*. Минск: БГУИР, 2019. 187 с. [Kozlov S. V. *Methods and means of electronic protection*. Minsk: BGUIR, 2019, 187 p. (in Russian)]

[8] *Защита радиолокационных систем от помех. Состояние и тенденции развития*. / ред. А. И. Канащенко и В. И. Меркулова. М.: Радиотехника, 2003. 416 с. [*Protection of radar systems from interference. Status and development trends*. Edited by A. I. Kanashenkov and V. I. Merkulov. Moscow: Radio engineering, 2003. 416 p. (in Russian)]

[9] Меркулов В.И., Лепин В.Н. *Авиационные системы радиоуправления. Ч. 1. Теоретические основы синтеза и анализа авиационных систем радиоуправления. Ч. 2. Радиоэлектронные системы самонаведения*. М.: Радио и связь, 1996. 396 с. [Merkulov V. I., Lepin V. N. *Aviation radio control systems. Part 1. Theoretical foundations of synthesis and analysis of aviation radio control systems. Part 2. Electronic homing systems*. Moscow: Radio and communications, 1996. 396 p. (in Russian)]

[10] Фомин А. Н., Копылов В. А., Андронов А. В. Филонов А. А. *Общая теория радиолокации и радионавигации. Распространение радиоволн*. Красноярск: СФУ, 2017. 319 с. [Fomin A. N., Kopilov V. A., Andronov A. V., Philonov A. A. *General theory of radar and radio navigation. Radio wave propagation*. Textbook. Krasnoyarsk: SFU, 2017. 319 p. (in Russian)]

[11] *Методы самонаведения истребителей и ракет класса «воздух–воздух» на групповую воздушную цель*: монография / А. В. Богданов, А. А. Филонов, А. А. Ковалев, А. А. Кучин, И. В. Лютиков; ред. А. А. Кучин. Красноярск: СФУ, 2014. 168 с. [*Methods of homing fighters and air-to-air missiles onto a group of air targets: monograph* / A. V. Bogdanov, A. A. Philonov, A. A. Kovalev, A. A. Kuchin, I. V. Liutikov; edited by A. A. Kuchin. Krasnoyarsk: SFU, 2014. 168 p. (in Russian)]

[12] Богданов А. В., Васильев О. В., Каневский М. И. и др. Результаты лётно-экспериментальных исследований по оценке возможностей всестороннего распознавания воздушных целей в импульсно-доплеровской РЛС воздушного базирования в сантиметровом диапазоне волн. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2016. № 11, 174–179 [Bogdanov A. V., Vasiliev O. V., Kanevskiy M. I. etc. Results of flight-experimental studies on the assessment of the capabilities of comprehensive recognition of air targets in an air-based pulse-doppler radar station in the centimeter wave range. *Achievements of modern radio electronics*. 2016. № 11ю 174–179 (in Russian)]

[13] Патент РФ № 2835459 *Способ функционирования активной радиолокационной головки самонаведения управляемой ракеты «воздух–воздух» при ее самонаведении на вертолет и постановке им уведящих по дальности и скорости помех*, 2025. Бюл. № 6. 11 с. [Patent Russian Federation # 2835459 *A method of operation of an active radar homing head of an air-to-air guided missile when homing on a helicopter and setting up interference that leads away the helicopter in range and speed*: 2025. № 6. 11 p. (in Russian)]

EDN: YRWMIA

УДК 629.783

Navigation System's Model with the Possibility of Implementing Deferred Processing for Measurements of Current Navigation Parameters

Mikhail N. Bogdanov^a,
Alexander S. Golovachev^a, Alexey Y. Kovalenko^a,
Alexey A. Tolmachev^b and Igor V. Lutikov^{c*}
^a*Military Space Academy named after A. F. Mozhaysky,
Saint Petersburg, Russian Federation*
^b*Military Aerospace Defense Academy
named after Marshal of the Soviet Union G. K. Zhukov
Tver, Russian Federation*
^c*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 14.07.2025, received in revised form 26.01.2026, accepted 28.01.2026

Abstract. The article presents a description of mathematical and simulation models of the functioning of the on-board navigation system of a spacecraft for the case when the device performs the task of monitoring space objects in conditions of a discrete or absent navigation field. This type of navigation field is manifested when spacecraft are located at altitudes above 2000 km above the Earth's surface (for the GLONASS system). In order to achieve the required decision-making speed and measurement accuracy, it is proposed to expand the composition of the complex and apply deferred processing in the calculation process. The proposed complex includes: a free-form inertial navigation system, consumer equipment for satellite navigation systems and a software-configurable radio receiver. The simulation of obtaining heterogeneous measurements was carried out, as well as their joint processing by the navigation system, provided that the integration scheme is strongly coupled. It is assumed that under the specified environmental conditions, the software receiver can obtain measurements of current navigation parameters (range and radial velocity in the developed model) due to incoherent accumulation. Based on the results of processing, the current location of the consumer is estimated, which determines the accuracy at a given time interval of the complex in question.

Keywords: spacecraft, measurements of current navigation parameters, free-form inertial navigation system, software-configurable radio receiver, satellite navigation system, consumer navigation equipment, GLONASS system.

© Siberian Federal University. All rights reserved

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

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



Модель навигационного комплекса с возможностью реализации отложенной обработки измерений текущих навигационных параметров

М. Н. Богданов^а, А. С. Головачев^а,
А. Ю. Коваленко^а, А. А. Толмачев^б, И. В. Лютиков^в
^аВоенно-космическая академия имени А. Ф. Можайского
Российская Федерация, Санкт-Петербург
^бВоенная академия воздушно-космической обороны
имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова
Российская Федерация, Тверь
^вСибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. В статье представлено описание математической и имитационной моделей функционирования бортового навигационного комплекса космического аппарата для случая, когда аппарат выполняет задачу мониторинга космических объектов в условиях дискретного или отсутствующего навигационного поля. Такой характер навигационного поля проявляется при нахождении космических аппаратов на высотах свыше 2000 км над поверхностью Земли (для системы ГЛОНАСС). Для достижения требуемых оперативности принятия решений и точности измерений предлагается расширить состав комплекса и применять в процессе вычислений отложенную обработку. В состав предлагаемого комплекса включены: бесплатформенная инерциальная навигационная система, аппаратура потребителя спутниковых навигационных систем и программно-конфигурируемое радиоприемное устройство. Осуществлена имитация получения разнородных измерений, а также их совместная обработка навигационным комплексом при условии, что схема комплексирования – сильносвязанная. Предполагается, что в указанных условиях обстановки программный приемник может получить измерения текущих навигационных параметров (в разработанной модели – дальность и радиальная скорость) за счет некогерентного накопления. По результатам обработки производится оценка текущего местоположения потребителя, по которой определяется точность на заданном интервале времени рассматриваемого комплекса.

Ключевые слова: космический аппарат, измерения текущих навигационных параметров, бесплатформенная инерциальная навигационная система, программно-конфигурируемое радиоприемное устройство, спутниковая навигационная система, навигационная аппаратура потребителя, система ГЛОНАСС.

Цитирование: Богданов М. Н. Модель навигационного комплекса с возможностью реализации отложенной обработки измерений текущих навигационных параметров / М. Н. Богданов, А. С. Головачев, А. Ю. Коваленко, А. А. Толмачев, И. В. Лютиков // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(2). С. 272–282. EDN: YRWMIA

Введение

В настоящее время наблюдается тенденция на использование аппаратуры потребителя (АП) спутниковых навигационных систем (СНС) в составе бортового навигационного комплекса (БНК) космических аппаратов (КА). Происходит это в целях уменьшения количества внешних траекторных измерений текущих навигационных параметров (ТНП) КА. Навигационная аппаратура потребителя (НАП) выполняет измерение первичных радионавигационных параметров в непрерывном навигационном поле в диапазоне высот от 0 до 2000 км, в прерывистом навигационном поле – от 2000 до 40000 км, а также в условиях полного его отсутствия – на высотах больше 40000 км над поверхностью Земли (для системы ГЛОНАСС).

КА, выполняющие задачу мониторинга космических объектов в ближней и дальней операционной зоне, нуждаются в достижении высокой оперативности и точности определения параметров движения (ПД), которые способны обеспечить только НАП [1]. Однако проблема дискретности или отсутствия навигационного поля вынуждает включить в состав БНК дополнительные технические средства (ТС), позволяющие БНК КА решать задачу определения текущего местоположения (ТМ).

Точность существующих альтернатив не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к указанным КА [2], поэтому в данной статье предлагается использовать отложенную обработку измерений ТНП.

Обоснование состава бортового навигационного комплекса космического аппарата

Из существующих ТС БНК наибольшей автономностью обладают бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) [3], поэтому данное средство зачастую становится основным в составе комплекса. Для навигационных измерений в космическом пространстве БИНС не подходит из-за природы орбитального движения: инерциальная система измеряет кажущееся ускорение (с помощью акселерометров), которое в условиях невесомости становится близким к нулю, а гравитационное ускорение акселерометры измерять не могут в связи с его компенсацией центробежной силой (в условиях орбитального движения). Поэтому акселерометры могут быть полезны только при осуществлении маневра КА. При этом датчики угловой скорости (гироскопы), которые также являются составной частью БИНС, активно применяются в существующих БНК для вычисления ориентации КА. Такой вариант построения БИНС (без применения акселерометров) называют бесплатформенной системой ориентации (БСО) [4].

В рассматриваемой модели БИНС играет решающее значение только потому, что в рамках исследования имитация измерений БИНС основывалась на теоретической модели гравитации – в реальных БНК такой подход применен быть не может, поэтому для оценки ТМ КА рекомендуется использовать астронавигационные системы и БСО.

В случае, когда произвести измерения с помощью НАП спутниковых систем не представляется возможным (по причинам низкого количества или полного отсутствия видимых НКА), предлагается использовать отложенную (апостериорную) обработку измерений, получаемых с помощью АП СНС. Идея отложенной обработки заключается в повышении точности измерений за счет уточнения прошлого вектора состояния КА с последующей экстраполяцией на текущий момент времени.

Если у потребителя периодически появляется возможность приема навигационных сигналов (НС), но время приема ниже времени «горячего старта» [5] (что делает невозможным штатное применение НАП), предлагается использовать в составе БНК программно-конфигурируемое радиоприемное устройство (ПКРУ). ПКРУ должно осуществлять прием НС (на соответствующей несущей частоте и с фиксированной полосой пропускания) и производить запись принятых данных, которые в дальнейшем используются для поиска и обнаружения сигналов СНС. Для обнаружения НС в условиях дискретного или отсутствующего навигационного поля необходимо произвести накопление модулей взаимной корреляционной функции принимаемого и опорного сигналов (некогерентное накопление) [6]. Процесс накопления занимает время, поэтому в БНК решается задача прогнозирования измерений ТНП на основании уже принятых и обработанных данных от НАП, а также непрерывная оценка измерений за счет альтернативных ТС. Полученные величины времен задержки и доплеровских смещений частоты (для каждого найденного сигнала) позволяют определить псевдоизмерения дальностей до доступных НКА и их радиальных скоростей. Так, измерения от ПКРУ включаются в алгоритм отложенной обработки и в совокупности с измерениями БИНС (и прочих ТС БНК) обеспечивают требуемую точность определения ТМ КА [2].

В состав рассматриваемого БНК входят: БИНС; НАП – для штатного режима работы; ПКРУ; буферное запоминающее устройство (БЗУ) – для записи данных с ПКРУ; НП – для обработки и оценки измерений; бортовое синхронизирующее устройство (БСУ) – для синхронизации независимых измерений.

В данной статье представлены результаты имитационного моделирования функционирования БНК с возможностью реализации отложенной обработки псевдодальностей от КА до НКА (\tilde{R}_k). Также предполагается получение с помощью представленной модели измерений радиальной скорости $\dot{\tilde{R}}_k$ (с учетом особенностей её вычисления в предлагаемом БНК).

Структура модели бортового навигационного комплекса космического аппарата

Из структуры модели (рис. 1) видно, что результатом на выходе является вектор состояния (ВС) КА \hat{B}_i^{KA} в i -й момент времени орбитального движения, который можно представить следующим образом:

$$\hat{B}_i^{KA} = [\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i, \hat{V}_{x_i}, \hat{V}_{y_i}, \hat{V}_{z_i}, \hat{\psi}_i, \hat{\theta}_i, \hat{\gamma}_i, Q_i^{БИНС}, Q_i^{СНС}]^T, \quad (1)$$

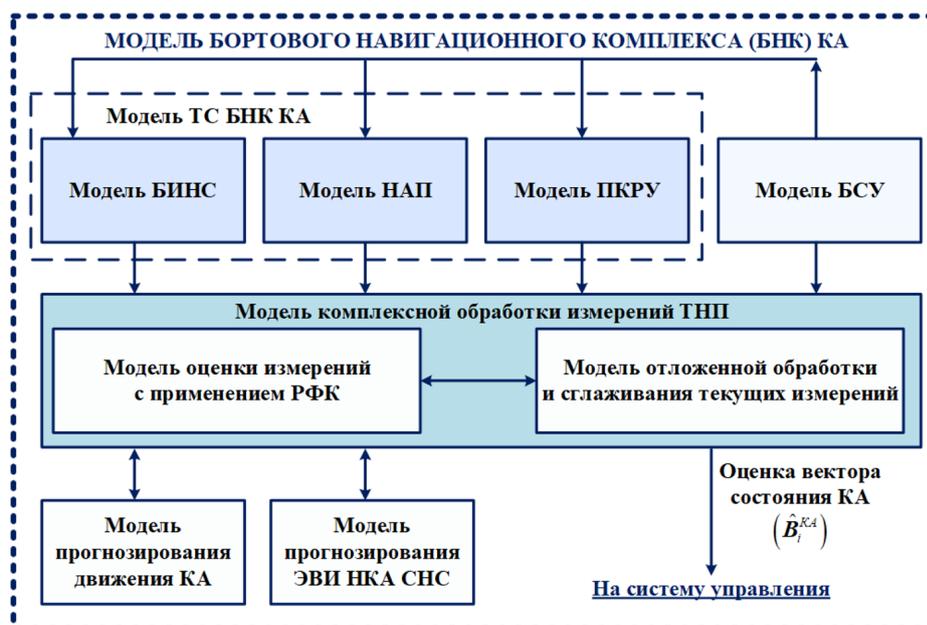
где $\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i$ – оценка местоположения КА в системе координат ПЗ-90; $\hat{V}_{x_i}, \hat{V}_{y_i}, \hat{V}_{z_i}$ – оценка проекций скоростей КА; $\hat{\psi}_i, \hat{\theta}_i, \hat{\gamma}_i$ – оценка ориентации КА: углов рыскания, тангажа и крена соответственно; $Q_i^{БИНС}$ – вектор ошибок датчиков БИНС; $Q_i^{СНС}$ – вектор ошибок АП СНС (ПКРУ и НАП).

Исходными данными для функционирования модели являются:

- модель динамики погрешностей средств измерений из состава БНК;
- нестабильность бортового стандарта частоты и погрешности БСУ;
- начальное положение и ориентация КА;
- эфемеридно-временная информация (ЭВИ) НКА СНС на момент начала измерений БНК.

Ограничения представленной модели:

- использование системы ГЛОНАСС;
- в качестве НС рассматривались BPSK-сигналы для частотных диапазонов L1 и L2.



Список условных сокращений:

БИНС – бесплатформенная инерциальная навигационная система;	СНС – спутниковая навигационная система;
ТС БНК – технические средства бортового навигационного комплекса;	ТНП – текущие навигационные параметры;
БСУ – бортовое синхронизирующее устройство;	ПКРУ – программно-конфигурируемое радиоприемное устройство;
КА – космический аппарат;	РФК – расширенный фильтр Калмана;
НАП – навигационная аппаратура потребителя;	ЭВИ – эфемеридно-временная информация.
НКА – навигационный космический аппарат;	

Рис. 1. Структура модели комплексной обработки измерений ТНП в БНК КА

Fig. 1. The structure of the integrated measurement processing model for measurements of current navigation parameters in the onboard navigation system of the spacecraft

Для анализа эффективности предлагаемой модели осуществляется имитация функционирования БНК, для этого:

- использована эфемеридно-временная информация (ЭВИ) из SP3 файлов, которые содержат синхронизированные по времени координаты и поправки часов для НКА системы ГЛО-НАСС на заданном временном интервале;
- прогнозирование ЭВИ НКА осуществляется интегрированием уравнений движения методом Рунге-Кутты четвертого порядка [7] (рис. 2);
- на основании истинных траекторий и результатов измерений НАП производится анализ реальных погрешностей АП СНС на заданный интервал времени (систематических и случайных);
- модель погрешностей для АП СНС составлена по [6];
- пространственный геометрический фактор как показатель, оказывающий влияние на точность определения ТМ потребителем СНС, вычисляется в соответствии с [8] и учитывается в оценке точности измерения псевдодалности;
- имитация измерений БИНС осуществляется на основании математической модели погрешностей из [3, 9].

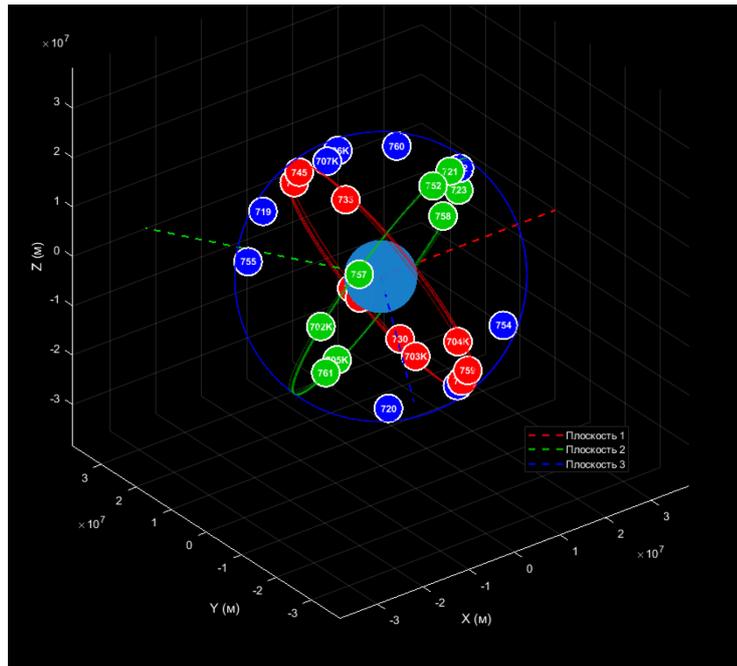


Рис. 2. Визуализация модели орбитального движения НКА системы ГЛОНАСС

Fig. 2. Visualization of the GLONASS spacecraft orbital motion model

Модель погрешностей технических средств бортового навигационного комплекса

Выражение для измерений АП СНС псевдодальностей от КА до k -го НКА можно представить в виде [6]

$$\tilde{R}_k(t) = \|B_k^{HKA}(t) - B_k^{KA}(t)\| + \sum_{j=1}^L \delta N_{k,j}(t), \quad (2)$$

где $B_k^{HKA}(t) = [x_k^{HKA}(t), y_k^{HKA}(t), z_k^{HKA}(t)]'$ – ВС k -го НКА на определенный момент времени в геоцентрической прямоугольной неинерциальной системе координат (ГПНСК); $B_k^{KA}(t) = [x_k^{KA}(t), y_k^{KA}(t), z_k^{KA}(t)]'$ – ВС КА в ГПНСК; $\delta N_{k,j}(t)$ – факторы, влияющие на точность кодовых измерений псевдодальности и выраженные в единицах длины; $\|\bullet\|$ – норма вектора в Евклидовом пространстве.

К факторам $\delta N_{k,j}(t)$, справедливым для орбитального движения КА, относятся такие, как: нестабильность опорных генераторов, формирующих шкалу времени, как на борту k -го НКА, так и на борту КА; влияние релятивистского эффекта; смещение и вариация фазовых центров антенн и многие другие [6].

В БИНС погрешности рассматриваются индивидуально для каждого из датчиков системы. Вектора погрешностей от датчиков (акселерометров δA_k и гироскопов δG_k) формируют матрицу ошибок датчиков БИНС $Q_i^{БИНС} = [\delta A_k^{KA}, \delta G_k^{KA}]$. Так, выражение для измерений кажущихся ускорений n_k БИНС в связанной системе координат (ССК):

$$\tilde{n}_k(t) = (1 + \Delta k_{a_k}(t)) \cdot n_k(t) + \sum_{l=1}^L \delta A_{k,l}^{KA}(t), \quad (3)$$

где $n_k(t)$ – истинное кажущееся ускорение вдоль k -й оси ССК; $\Delta k_{a_k}(t)$ – погрешность коэффициента преобразования k -го акселерометра; $\delta A_{k,l}^{KA}(t)$ – суммарная аддитивная погрешность k -го акселерометра.

К погрешностям $\delta A_{k,l}^{KA}(t)$ относятся: смещение нуля акселерометра; «случайное блуждание скорости» (VRW – Velocity Random Walk) и ошибка ввода начальных условий [9].

Выражение для измерений в БИНС угловых скоростей ω_k в ССК:

$$\tilde{\omega}_k(t) = (1 + \Delta k_{v_k}(t)) \cdot \omega_k(t) + \sum_{l=1}^L \delta G_{k,l}^{KA}(t); \quad (4)$$

где $\omega_k(t)$ – истинная угловая скорость вдоль k -й оси ССК; $\Delta k_{v_k}(t)$ – погрешность коэффициента преобразования k -го гироскопа; $\delta G_{k,l}^{KA}(t)$ – суммарная аддитивная погрешность k -го гироскопа.

К погрешностям $\delta G_{k,l}^{KA}(t)$ относятся: смещение нуля гироскопа; «случайное блуждание угла» (ARW – Angle Random Walk); ошибка ввода начальных условий [9].

Использование измерений угловой скорости от гироскопов ω_k необходимо для уточнения измерений акселерометров [3], поэтому углы ориентации входят в состав ВС КА и необходимы для достижения высокой точности определения ТМ БНК КА.

Интегрирование величин $\tilde{n}_k(t)$ и $\tilde{\omega}_k(t)$ формирует оценку ВС КА (1) на основании измерений только от БИНС:

$$\hat{B}_i^{\text{БИНС}} = [\hat{x}_i^{\text{БИНС}}, \hat{y}_i^{\text{БИНС}}, \hat{z}_i^{\text{БИНС}}, \hat{V}_x^{\text{БИНС}}, \hat{V}_y^{\text{БИНС}}, \hat{V}_z^{\text{БИНС}}, \hat{\psi}_i^{\text{БИНС}}, \hat{\theta}_i^{\text{БИНС}}, \hat{\gamma}_i^{\text{БИНС}}, Q_i^{\text{БИНС}}]^T. \quad (5)$$

В описываемой модели подразумевается использование сильносвязанной схемы комплексирования [1], поэтому НП на основании знания прогнозируемого вектора состояния КА в фиксированный момент времени $\tilde{B}^{KA}(t)$ и величин $\tilde{n}_k(t)$ и $\tilde{\omega}_k(t)$ должен вычислять значения псевдоизмерений дальностей $\tilde{R}_k^{\text{БИНС}}(t)$ и радиальных скоростей $\tilde{R}_k^{\text{БИНС}}(t)$.

Представленные математические модели измерений АП СНС и БИНС (с учетом возникающих погрешностей) позволяют разработать полную имитационную модель БНК с возможностью реализации отложенной обработки измерений ТНП. Такая модель предназначена для анализа оптимальности предлагаемого состава БНК и предложенного метода обработки и комплексирования.

Модель комплексной обработки измерений текущих навигационных параметров

Комплексная обработка измерений ТНП происходит в двух режимах: реального времени и апостериорном режиме.

В режиме реального времени применяется алгоритм комплексирования измерений БИНС и НАП (в случае возможности получения измерений от НАП) на основе расширенного фильтра Калмана (РФК).

Дискретная модель системы для РФК:

$$x_i = \Phi(i, i-1) + \Gamma(i-1) \cdot w(i-1), \quad (6)$$

где x_i – истинное состояние системы (значение $R_k(i)$) в момент i ; $\Phi(i, i-1)$ – матрица перехода состояния от $i-1$ к i ; $\Gamma(i-1)$ – матрица возмущения состояния; $w(i-1)$ – вектор белых шумов системы.

Матрица перехода $\Phi(i)$ и вектор белых шумов $w(i)$ формируются на основании априорной информации о погрешностях БИНС $Q_i^{БИНС}$.

Уравнения прогноза РФК:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{i|i-1} &= \Phi(i, i-1) \cdot \hat{x}(i-1|i-1); \\ P_{i|i-1} &= \Phi(i, i-1) \cdot P(i-1|i-1) \cdot \Phi^T(i, i-1) + \Gamma(i-1) \cdot Q(i-1) \cdot \Gamma^T(i-1), \end{aligned} \quad (7)$$

где $\hat{x}_{i|i-1}$ – априорная оценка состояния (прогноз на шаг i по данным $i-1$); $P_{i|i-1}$ – априорная ковариационная матрица ошибок оценки; $Q(i-1)$ – матрица шумов процесса, включающая погрешности БИНС $Q_i^{БИНС}$.

Модель измерений (коррекции):

$$z_i = H_i \cdot x_i + v_i, \quad (8)$$

где z_i – вектор измерений $\tilde{R}_k(t)$, $\tilde{R}_k(t)$, $\tilde{n}_n(t)$, $\tilde{\omega}_n(t)$; H_i – матрица наблюдений; v_i – вектор белых шумов измерений, включающий в себя $Q_i^{БИНС}$, $Q_i^{СНС}$.

Уравнения коррекции:

$$\begin{aligned} K_i &= P_{i|i-1} \cdot H_i^T (H_i \cdot P_{i|i-1} \cdot H_i^T + R_i)^{-1}; \\ \hat{x}_{i|i} &= \hat{x}_{i|i-1} + K_i (z_i - H_i \cdot \hat{x}_{i|i-1}); \\ P_{i|i} &= (I - K_i \cdot H_i) P_{i|i-1}, \end{aligned} \quad (9)$$

где K_i – коэффициент усиления Калмана на временном шаге i ; R_i – ковариационная матрица шумов измерений; $\hat{x}_{i|i}$ – апостериорная оценка измерений; $P_{i|i}$ – апостериорная ковариационная матрица ошибок; I – единичная матрица.

В случае реализации отложенной КО (на основании измерений ПКРУ) применяется модификация алгоритма сглаживания Рауха-Тунга-Стрибела для фиксированного числа наблюдений (измерений). Особенность модификации заключается в способности применения данного алгоритма в динамичной системе, то есть постобработка осуществляется в условиях движущегося потребителя и сглаживание измерений происходит в определенные моменты времени орбитального движения КА:

$$\begin{aligned} C_i &= P_{i|i} \cdot \Phi^T(i+1, i) \cdot P_{i+1|i}^{-1}; \\ \hat{x}_{i|N} &= \hat{x}_{i|i} + C_i (\hat{x}_{i+1|N} - \hat{x}_{i+1|i}); \\ P_{i|N} &= P_{i|i} + C_i (P_{i+1|N} - P_{i+1|i}) C_i^T, \end{aligned} \quad (10)$$

где C_i – матрица коэффициентов усиления сглаживания на шаге i ; $\Phi(i+1, i)$ – матрица перехода состояния от момента i к $i+1$; $P_{i+1|i}$ – априорная ковариационная матрица на шаге $i+1$; $\hat{x}_{i|N}$ – сглаженная оценка состояния в момент i по всем данным до N ; N – конечная точка обрабатываемого сегмента данных; $P_{i|N}$ – сглаженная ковариационная матрица ошибок.

Применение фильтрации и сглаживания измерений позволяет повысить точность определения ТМ БНК КА (по сравнению с точностью автономного ТС БНК) до значения потенциальной точности (с учетом систематических погрешностей) для БНК с применением СНС в космическом пространстве.

Расширение состава БНК позволит повысить точность определения ТМ, но при этом возникающая избыточность измерений снижает скорость вычислений. Оперативность решения зависит от производительности НП.

Результаты моделирования функционирования бортового навигационного комплекса

Моделирование проводилось с учетом следующих ограничений.

– Имитация измерений БИНС предполагает измерения в пространстве на основании показаний трех разнесенных акселерометров и датчиков угловой скорости. Реализация численных алгоритмов (кинематических уравнений) производилась в гиперкомплексной конструкции, систематизирующей параметры Родрига-Гамильтона – кватернионе.

– Погрешности измерения ТНП ПКРУ и погрешности определения ТМ НАП моделировались в соответствии с учетом космической среды, орбитального движения КА и особенностей системы ГЛОНАСС [7].

– Исследовалось функционирование БНК КА, выполняющего задачу мониторинга космических объектов в дальней операционной зоне (ДОЗ), дальность нахождения такого КА от поверхности Земли достигает до 42000 км.

Результаты моделирования представлены на рис. 3.

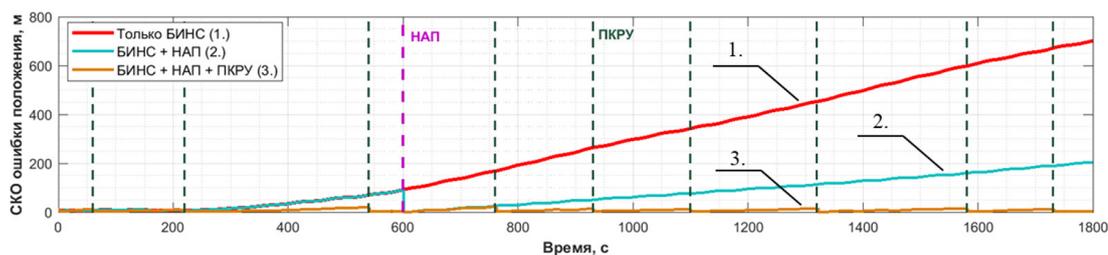


Рис. 3. Результаты комплексной обработки измерений текущих навигационных параметров

Fig. 3. Results of complex processing of measurements of current navigation parameters

Таким образом, девять раз за время имитационного моделирования орбитального движения (30 минут) КА и функционирования БНК в обработку принимались измерения от ПКРУ, не считая момента начальной выставки навигационных параметров. НАП в данной реализации участвовала в формировании оценки измерений один раз.

Применение только БИНС для оценки ВС КА, функционирующего в ДОЗ, нецелесообразно, требуется компенсировать растущие ошибки с помощью дополнительных ТС БНК. Уточнение измерений БИНС с помощью использования ПКРУ и отложенной обработки позволяет достичь СКО определения ТМ в районе 6 м, что для КА, БНК которого не использует уточнения измерений от СНС с помощью функциональных дополнений и не применяет дифференциальных режимов, а также прочих аналогичных методов коррекции навигационных параметров, является высоким результатом и удовлетворяет предъявляемым требованиям [2].

Заключение

Автономные ТС БНК не способны обеспечить высокую точность определения ТМ без использования измерений от АП СНС.

Отложенная обработка способна решить теоретическую проблему низкой длительности приема НС, а фильтрация и сглаживание измерений позволяют добиться требуемой точности определения ТМ.

Разработанная модель БНК КА позволяет с определенными ограничениями произвести имитацию измерений БНК, а также демонстрирует эффективность использования отложенной обработки измерений ТНП как способ, обеспечивающий оперативность (за счет наличия БИНС) и точность (за счет наличия ПКРУ) определения ПД КА, выполняющего задачу мониторинга космических объектов.

Предлагаемый состав БНК может быть рекомендован при практической реализации комплексов, функционирующих в условиях дискретного или отсутствующего навигационного поля.

Список литературы / References

[1] Вовасов В. Е., Герко С. А. *Комплексование радиотехнических систем управления с другими информационными датчиками*, М.: Горячая линия – Телеком, 2023. 242 с. [Vovasov V. E., Gerko S. A. *Integration of radio engineering control systems with other information sensors*, Moscow: Hotline – Telecom, 2023. 242 p. (in Russian)]

[2] Ивашина А. В., Богданов М. Н., Парамонов Г. Д., Паршин И. О. Методика оценки влияния качества навигационно-временного обеспечения полета космических аппаратов на решение ими целевых задач. *Труды ВКА имени А. Ф. Можайского*, 2025, 696, 104–110 [Ivashina A. V., Bogdanov M. N., Paramonov G. D., Parshin I. O. Methodology for assessing the impact of the quality of navigation and time support for spacecraft flight on their solution of target tasks. *Proceedings of the Mozhaisky High School of Economics*, 2025, 696, 104–110 (in Russian)]

[3] Матвеев В. В., Распопов В. Я. *Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем*, Санкт-Петербург: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 280 с. [Matveev V. V., Raspopov V. Ya. *Fundamentals of building free-form inertial navigation systems*, Saint Petersburg: SSC RF, Concern Central Research Institute Electropribor, 2009. 280 p. (in Russian)]

[4] Матвеев В. В., Колесникова А. Г. Бесплатформенная система ориентации на МЭМС-датчиках. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2023, 8, 389–393 [Matveev V. V., Kolesnikova A. G. A free-form orientation system based on MEMS sensors. *News of TulsU. Technical Sciences*, 2023, 8, 389–393 (in Russian)]

[5] Семенов С. А., Фридман А. Е. Уменьшение времени до навигационного решения при включении приемника в режиме теплого старта. *Вопросы радиоэлектроники*, 2020, 4, 22–26 [Semenov S. A., Fridman A. E. Reducing the time to the navigation solution when turning on the receiver in the warm start mode. *Radio Electronics Issues*, 2020, 4, 22–26 (in Russian)].

[6] Перов А. И., Бакитко Р. В., Дворкин В. В. [и др.]. *ГЛОНАСС. Модернизация и перспективы развития. Монография*, М.: Радиотехника, 2020. 1072 с. [Perov A. I., Bakitko R. V., Dvorkin V. V. [and others]. *GLONASS. Modernization and development prospects. Monograph*, M.: Radio Engineering, 2020. 1072 p. (in Russian)]

[7] Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. *Интерфейсный контрольный документ. Глобальная система высокоточного определения навигационной и эфемеридно-временной информации в реальном времени для гражданских потребителей*, М.: ГК «Роскосмос», 2020. 106 с. [Global navigation satellite system GLONASS. *An interface control document. Global system for high-precision determination of navigation and ephemeris-time information in real time for civilian consumers*, Moscow: Roscosmos State Corporation, 2020. 106 p. (in Russian)]

[8] Ватутин С.И. Оценка геометрического фактора для наземного потребителя системы ГЛОНАСС с высокоэллиптическим дополнением. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. М.: АО «Российские космические системы», 2016, Т. 3, 3, 12–28. [Vatutin S. I. Evaluation of the geometric factor for the ground consumer of the GLONASS system with a highly elliptical complement. *Rocket and space instrumentation and information systems*. Moscow: JSC “Russian Space Systems”, 2016, vol. 3, 3, 12–28 (in Russian)]

[9] Матвеев В.В. Инженерный анализ погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы. *Известия ТулГУ. Технические науки*. Тула, 2014, 9, Ч. 2, 251–266 [Matveev V. V. Engineering error analysis of a strapback inertial navigation system. *News of TULSU. Technical sciences*. Tula, 2014, 9, Part 2, 251–266 (in Russian)]