

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

**Журнал Сибирского  
федерального университета  
Техника и технологии**

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

**2025 18 (3)**

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

2025 18(3)

# 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*

№ 3. 28.05.2025. 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 20.05.2025. Формат 60x90/8. Усл. печ. л. 11,3.  
Уч.-изд. л. 10,7. Бумага тип. Печать офсетная. Тираж 1000 экз. Заказ № 23368.

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

## CHIEF EDITOR

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

---

## EDITORIAL BOARD

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

## CONTENTS

### Researching. Design. Operating Experience

<b>Nikolay K. Borodin and Vladimir A. Kulagin</b> Process Improvement at Heating Stations in Heat Supply Systems .....	300
<b>Pavel A. Shchinnikov, Olesya V. Borush and Alina A. Luzina</b> Influence of the Thermodynamic Parameters and Architecture of the Two-Stage Rankin Cycle on Its Efficiency .....	325
<b>Denis I. Karabarin</b> Design and Experimental Analysis of a 4kW Rankine Organic Cycle Installation on an R142b.....	343
<b>Tatyana A. Kulagina, Olga G. Dubrovskaya, Vyacheslav I. Bashun and Sophia D. Dubrovskay</b> Wastewater Conditioning of the Hydraulic Extraction System Using Cavitation Technology as a Basis for Reducing the Environmental Risks of Thermal Power Plants.....	352
<b>Antonina A. Filimonova, Alena Y. Vlasova, Natalia D. Chichirova and Ruzina F. Kamalieva</b> Hydrogen Sulfide Surface Adsorption Study on Composite Materials from Waste Water of Thermal Power Plants.....	369
<b>Elena V. Korotkova, Fedor M. Noskov and Liudmila I. Kveglis</b> Structure and Phase Composition of Industrial Alloy 47CrNiMo After Aging .....	380
<b>Sergei L. Busygin, Nikolai N. Dovzhenko, Aleksandr M. Tokmin, Aleksandr A. Shaichadinov, Sergei V. Mishnev</b> Strengthening of Electrically Conductive Cu-MMNCR Composite Material with a Copper- Based Metal Matrix by Nano- and Micro- Sized Chromium Particles .....	392
<b>Yuriy L. Koziratskiy, Alexander A. Bolkunov, Anton A. Koziratskiy and Anton A. Barkalov</b> Method of Substantiation of the Algorithm of Detection of Multispectral Spontaneous Radiation and Assessment of Its Efficiency .....	409
<b>Muhanned AL-Rawi</b> Analysis of Massive MIMO System Performance in Rician Fading Channel .....	419
<b>Information and Communication Technologies</b>	
<b>Sergey V. Shostak, Alexander V. Bengard, Evgeny F. Sverdlov, Grigory V. Dorofeev and Pavel A. Starodubtsev</b> Maximum Likelihood Method Application to Signal Processing in Digital Information Exchange Systems.....	428

## СОДЕРЖАНИЕ

### Исследования. Проектирование. Опыт эксплуатации

**Н. К. Бородин, В. А. Кулагин**

Совершенствование технологического процесса на тепловых пунктах  
в системах теплоснабжения ..... 300

**П. А. Щинников, О. В. Боруш, А. А. Лузина**

Влияние термодинамических параметров и архитектуры двухступенчатого цикла Ренкина  
на его эффективность ..... 325

**Д. И. Карбарин**

Проектирование и экспериментальный анализ установки органического цикла Ренкина  
на 4кВт на рабочем теле R142b ..... 343

**Т. А. Кулагина, О. Г. Дубровская,**

**В. И. Башун, С. Д. Дубровская**

Кондиционирование стока системы гидрозолоудаления с применением  
кавитационной технологии как основа снижения экологических рисков ТЭЦ ..... 352

**А. А. Филимонова, А. Ю. Власова,**

**Н. Д. Чичирова, Р. Ф. Камалиева**

Изучение поверхностной адсорбции сероводорода на композитных материалах  
из отходов водоподготовительной установки ТЭС ..... 369

**Е. В. Короткова, Ф. М. Носков, Л. И. Квеглис**

Структура и фазовый состав в промышленном сплаве 47ХНМ после старения ..... 380

**С. Л. Бусыгин, Н. Н. Довженко,**

**А. М. Токмин, А. А. Шайхадинов, С. В. Мишнев**

Упрочнение нано- и микроразмерными частицами хрома электропроводного композиционного  
материала Cu–MMNCr с металлической матрицей на основе меди ..... 392

**Ю. Л. Козирацкий, А. А. Болкунов,**

**А. А. Козирацкий, А. А. Баркалов**

Методика обоснования алгоритма обнаружения многоспектрального спонтанного излучения  
и оценки его эффективности ..... 409

**Муханнед Аль-Раби**

Анализ производительности системы Massive MIMO в канале с замираниями Райса ..... 419

### Информационно-коммуникационные технологии

**С. В. Шостак, А. В. Бенгард,**

**Е. А. Свердлов, Г. В. Дорофеев, П. А. Стародубцев**

Применение метода максимального правдоподобия для обработки сигналов  
в цифровых системах обмена информацией ..... 428

**Researching. Design.  
Operating Experience**

**Исследования.  
Проектирование.  
Опыт эксплуатации**



Theoretical and Applied Heat Engineering  
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: LGAVIM

УДК 697.34

Process Improvement at Heating Stations  
in Heat Supply Systems

Nikolay K. Borodin<sup>a</sup> and Vladimir A. Kulagin<sup>b\*</sup>

*<sup>a</sup>«Krasnoyarsk Heating Network» (branch  
of OJSC Yenisei TGC (TGC-13)*

*Krasnoyarsk, Russian Federation*

*<sup>b</sup>Siberian Federal University*

*Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 10.02.2025, received in revised form 04.04.2025, accepted 7.04.2025

**Abstract.** One of the directions of energy saving in district heating systems is the improvement of schemes and parameters of heat networks, including through the regulation of the technological process at heating stations. The study of operating modes of such heat networks, which are a link between heat sources and consumers, provides for the adoption of specific design and technological solutions that contribute to the saving of heat and electricity. In the operation of heat supply systems, there are often situations when heat supply complexes, designed with equipment meeting modern requirements, demonstrate low reliability and efficiency associated with other technological parameters. Therefore, improving the methodology for selecting new and improving the efficiency of existing heat networks is an urgent task, the solution of which will improve the quality and reliability of district heating systems as a whole, which corresponds to one of the strategic directions of Russia's development – modernization of the energy sector and improving the energy efficiency of heat supply systems. Improvement of technological process regulation at heating stations in heat supply systems is possible due to the application of neural network convergence technologies.

**Keywords:** thermal networks, technological process, modernization of energy, neural network convergence technologies.

Citation: Borodin N. K., Kulagin V. A. Process Improvement at Heating Stations in Heat Supply Systems. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(3), 300–324. EDN: LGAVIM



© Siberian Federal University. All rights reserved

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

\* Corresponding author E-mail address: v.a.kulagin@mail.ru

## Совершенствование технологического процесса на тепловых пунктах в системах теплоснабжения

Н. К. Бородин<sup>а</sup>, В. А. Кулагин<sup>б</sup>

<sup>а</sup>«Красноярская теплосеть»

(филиал ОАО «Енисейская ТГК (ТГК-13)»)

Российская Федерация, Красноярск

<sup>б</sup>Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, Красноярск

**Аннотация.** Одним из направлений энергосбережения в системах централизованного теплоснабжения является совершенствование схем и параметров тепловых сетей, в том числе за счет регулирования технологического процесса на тепловых пунктах. Исследование режимов работы таких тепловых сетей, являющихся связующим звеном между источниками и потребителями теплоты, обеспечивает принятие конкретных проектных и технологических решений, способствующих экономии тепловой и электрической энергии. При эксплуатации систем теплоснабжения часто встречаются ситуации, когда комплексы теплоснабжения, спроектированные с отвечающим современным требованиям оборудованием, демонстрируют низкую надежность и эффективность, связанные с другими технологическими параметрами. Поэтому совершенствование методики выбора новых и повышение эффективности существующих тепловых сетей является актуальной задачей, решение которой позволит повысить качество и надежность работы систем централизованного теплоснабжения в целом, что соответствует одному из стратегических направлений развития России – модернизации энергетики и повышению энергоэффективности систем теплоснабжения. Совершенствование регулирования технологического процесса на тепловых пунктах в системах теплоснабжения возможно за счет применения нейросетевых технологий сходимости.

**Ключевые слова:** тепловые сети, технологический процесс, модернизация энергетики, нейросетевые технологии сходимости.

Цитирование: Бородин Н. К. Совершенствование технологического процесса на тепловых пунктах в системах теплоснабжения / Н. К. Бородин, В. А. Кулагин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(3), С. 300–324. EDN: LGAVIM

### Введение

Повсеместное применение терморегуляторов у отопительных приборов систем отопления привело к переходу от качественного регулирования к качественно-количественному. Это потребовало соответствующего научного, технического и практического подхода в обеспечении эффективной работоспособности системы отопления и системы централизованного теплоснабжения, рассматриваемых как единое целое. Безусловно, существующие теплосети не в полной мере отвечают современным условиям регулирования теплоснабжения зданий [1].

Согласно ст. 29 ФЗ-190 «О теплоснабжении» с 1 января 2022 года предусмотрен запрет на использование централизованных открытых систем теплоснабжения. Это требование вызвало бурное обсуждение специалистов энергетической отрасли [2]. Развитие теплоснабжения в нашей стране ориентировано на создание крупных систем централизованного теплоснабжения [3]. Российская система теплоснабжения включает в себя более 50 тыс. локальных систем теплоснабжения. Система теплоснабжения включает в себя источник тепла, систему транспор-

та теплоносителя (тепловые сети) и системы теплоснабжения. Подключение систем теплоснабжения к тепловым сетям осуществляется в тепловых пунктах [4].

Анализ современного состояния АСУТП на базе ПТК на ТЭС показывает следующие основные проблемы управления производственными процессами: недостаточный уровень интеллектуальности процессов регулирования и управления, особенно в части управления производственными процессами на станционном уровне; низкая технико-экономическая эффективность производства энергии из-за отсутствия в прикладном программном обеспечении (ППО) ПТК алгоритмов решения оптимизационных задач как блочного, так и станционного уровней; отсутствие методических подходов и практических рекомендаций по интеграции алгоритмов оптимального управления в ППО ПТК, как при наличии на станциях полномасштабных АСУТП или при их наличии на части оборудования станции [5]. Обусловлено это тем, что в современных АСУТП на базе ПТК заложенный в них потенциал программных и информационных возможностей используется далеко не в полной мере. Очевидно, что это дает большой простор и ресурсы для повышения интеллектуальности АСУ ТП. Ситуация усложняется тем, что, к сожалению, многие разработанные алгоритмы оптимизации не нашли широкого применения ввиду недостаточной их проработанности или отсутствия возможности реализации надлежащего взаимодействия между ПТК и программами, реализующими оптимизационный алгоритм, а также большой доли ручного ввода начальных данных, выполняемого при каждом изменении задания. Следовательно, для внедрения автоматизированного управления режимами работы электростанции необходимо усовершенствовать техническое и информационное обеспечение АСУ ТП, работающих на базе ПТК. В настоящее время в энергетической области большое внимание уделяется изучению и разработке новых средств на базе искусственного интеллекта – интеллектуальных алгоритмов, машинного обучения, нечеткой логики и т.д. Повышение степени автоматизации и интеллектуальности АСУ ТП может значительно улучшить эффективность и качество управления производственными процессами, освободить человека от рутинной деятельности, облегчить работу операторов и вместе с тем значительно снизить вероятность возникновения сбоев в работе по вине человеческого фактора. Одним из таких направлений является разработка и внедрение в ППО ПТК интеллектуальных алгоритмов повышения качества регулирования [5]. По сути, здесь речь идет о классических ПИД-регуляторах, которые настраиваются с использованием нейросетей. При этом нейросеть обучается вручную на одном типовом устройстве. Более того, используются классические ПЛК достаточно в упрощенном варианте.

В работах [6, 7] представлены результаты модернизации и эксплуатации, современных АСУТП на базе ПТК, в том числе:

- определение путей повышения эффективности АСУТП и технологических процессов путем разработки и внедрения современных интеллектуальных технологий управления;
- оценки технической и экономической целесообразности повышения интеллектуальности АСУТП путем интеграции в прикладное программное обеспечение ПТК оптимизационных задач блочного и особенно станционного уровней;
- разработка интеллектуального регулятора, его обучение и варианты его использования при решении практических задач в рамках интеллектуальной АСУТП;
- оценки возможности путей и целесообразности интеграции в ППО ПТК интеллектуальных алгоритмов и технологий управления.

В работе [8] рассмотрены вопросы создания на научной основе систем логического управления технологическими процессами и оборудованием, их последовательная увязка по иерархическим уровням и интеграция в единую сеть сбора и обработки данных. В исследовательской части работы рассмотрены: методология и формализованные методы построения систем логического управления технологическими процессами и оборудованием; теоретические основы, средства и методы промышленной технологии создания систем логического управления; теоретические основы, алгоритмы и методы решения прикладных задач при построении систем логического управления; использование методов автоматизированного проектирования для повышения эффективности разработки и модернизации систем логического управления.

Вопросы моделирования, проектирования, разработки, программирования и эксплуатации систем логического управления рассмотрены в работах таких российских и зарубежных ученых, как: Сосонкин В.Л., Соломенцев Ю.М., Мартинов Г.М., Юдицкий С.А., Гаврилов М.А., Грейнер Г.Р., Петров И.В., Аршанский М.М., Титаренко Ю.И., Дубинин В.Н., G. Olsson, G. Piani, Rullan A., E. A. Parr, Frank D. Petruzella, Quan Liang и др.

В нашей стране теорией и практикой релейно-контактных схем автоматизации занимались М.А. Гаврилов, В.М. Копыленко, Г.Р. Грейнер. Большой вклад в теорию синтеза систем управления внес С.А. Юдицкий, который положил основы синтеза систем логического управления для машин-автоматов. С.А. Юдицкий также было предложено применение математического аппарата на базе сетей, разработанного К.А. Петри для моделирования систем управления. Построение систем логического управления в рамках машиностроительных производств имеет свои особенности, в частности, это согласованная работа контроллеров в рамках систем ЧПУ, в качестве головного устройства в гибких производственных модулях (ГПМ), ячейках (ГПЯ) и системах (ГПС). Развитием теории проектирования систем логического управления в машиностроении занимались Ю.М. Соломенцев, В.Л. Сосонкин, М.М. Аршанский, а позднее и Г.М. Мартинов. На очередном витке развития технологий Г. Бучем была предложена объектно ориентированная парадигма проектирования и программирования, которая нашла применение и в промышленных системах управления, в том числе и в логическом управлении. Развитием теории построения промышленных систем управления на основе объектно ориентированной парадигмы на западе занимались A. Rullan, E. A. Parr, F.D. Petruzella, в России – Шалыто А.А., Аршанский М.М., Мартинов Г.М. и др. [8]. Однако в данной работе речь идет об отечественной разработке, направленной на импортозамещение, при этом разработка ведется на.NET, что привязывает ее к Windows. Архитектура также вызывает вопросы – известны работы над SoftPLC, степень проработки в которых значительно глубже, архитектура более продуманная, универсальная и лишена недостатков, описываемых в этой работе.

В диссертации [9] сформирована математическая модель, разработаны алгоритмы и вычислительная программа для расчета во времени режимов функционирования сложных систем теплоснабжения с автоматизированными и неавтоматизированными системами теплопотребления при нерасчетных условиях, а также процессы нестационарной теплопередачи в ограждающих конструкциях зданий, при помощи которых оценивается изменение параметров микроклимата в них. На основе проведенных теоретических исследований [10, 11] изменения тепловых и гидравлических режимов СЦТ и параметров микроклимата в зданиях при меняющихся климатических условиях и нерасчетных параметрах теплоносителя установлена

зависимость допустимых отклонений температур теплоносителя при различных степенях автоматизации тепловых нагрузок (на примере структуры тепловых нагрузок СЦТ от тепловых источников Омского филиала ОАО «ТГК-11»).

При использовании нейросетевого подхода к решению задач управления на основе прогнозирующих нейросетевых моделей реализованы и исследованы алгоритмы построения прогнозирующих моделей с использованием нейросетевых технологий, а также реализованы алгоритмы настройки параметров нейросетевых регуляторов [12]. Среди всего многообразия нейросетевых структур для решения задач идентификации и управления предлагается использовать многослойные персептронные сети с математической моделью нейрона У.С. МакКаллока и У. Питтса. Этот выбор обуславливается возможностью ИНС указанной архитектуры моделировать произвольные нелинейные отображения «вход-выход», что играет существенную роль при использовании нейронных сетей в качестве модельных структур при решении задачи идентификации.

Основополагающими в становлении теории идентификации и ее применения для исследования и адаптивного управления производственными процессами являются труды таких отечественных и зарубежных ученых, как Бахтадзе Н. Н., Красовский А. А., Райбман Н. С., Растрингин Л. А., Розенвассер В. В., Ротач В. Я., Рубан А. И., Цыпкин Я. З., Фомин В. Н., Фрадков А. Л., Чадеев В. М., Штейнберг Ш. Е., Юсупов Р. М., Ядыкин И. Б., Якубович В. А. Eukhoff P., Graupe D, Kaminskas V., Ljung L., Sage A. P. и др.

Вопросам разработки методологических основ исследования свойств сложных объектов (примерами которых являются объекты теплоэнергетики), важных для создания систем управления, посвящены работы Емельянова С. В., Уткина В. И. (системы с переменной структурой), Острейковского В. А. (вероятностный анализ безопасности АЭС), Соколова Б. В. (управление структурной динамикой сложных объектов), Амбарцумяна А. А., Колесова Ю. Б., Сениченкова Ю. Б., Alur R., Maler Z. A., Lygeros J. (гибридные системы) и др. [13]. В результате анализа работ, посвященных вопросам использования технологий искусственного интеллекта при проектировании систем управления, выявлена перспективность создания методологии для разработки методов оптимизации систем управления теплоэнергетическими процессами, а также стратегий управления на базе интеллектуальных технологий.

Развитие методов и средств искусственного интеллекта позволяет применять их к все более широкому кругу проблем вообще и к задачам теории оптимального управления в частности. В первую очередь это относится к задачам, для которых получены только приближенные методы решения либо время решения точными методами достаточно велико. К классу таких задач, несомненно, относится параметрическая оптимизация различного рода автоматических систем по критериям разного вида. Решению задачи параметрической оптимизации с помощью приближенных методов, как для линейных, так и для импульсных автоматических систем, посвящены работы Я. З. Цыпкина [15], Л. А. Растрингина [16], К. А. Пупкова и Н. Д. Ергупова [17], Е. П. Стефани [50], В. Я. Ротача [23], Ш. Е. Штейнберга [19], В. П. Плюто [20], В. И. Костюка и Л. А. Широкова [21], Д. П. Кима [22] и др. Вместе с тем современной тенденцией при проектировании и разработке систем автоматического управления является применение не только интегральных, но и иных, нестандартных критериев [23], а также увеличение числа настраиваемых параметров [14].

Большой вклад в применение генетического алгоритма для решения различного рода оптимизационных задач внесли Дж. Холланд [24, 25], К. А. De Jong [26], Д. Голдберг [27], Haupt R. L., Haupt S. E. [28], Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, С. Н. Петрашев, С. А. Сергеев [29], Д. Рутковская [30], В. М. Курейчик [31], В. Р. Сабанин, Н. И. Смирнов, А. И. Репин [32–34] и др. [14].

### Методология исследования

Устройство ИТП обязательно для каждого здания независимо от наличия ЦТП [35]. Тепловые пункты (ТП) являются важнейшим элементом системы теплоснабжения. Они предназначены для приема теплоносителя от магистральных тепловых сетей, его распределения между потребителями и регулирования параметров теплоносителя (температуры, давления). Основные задачи тепловых пунктов включают в себя:

- Регулирование температуры и давления теплоносителя: ТП оснащены теплообменниками, насосами и регулирующей арматурой, которые позволяют поддерживать оптимальные параметры теплоносителя для различных потребителей.
- Разделение потоков теплоносителя: ТП позволяют распределять теплоноситель между различными зонами и потребителями, обеспечивая равномерное теплоснабжение.
- Поддержание оптимального режима работы системы: ТП обеспечивают стабильную и надежную работу всей системы теплоснабжения, предотвращая перегрузки и аварии.
- Мониторинг и контроль параметров системы: современные ТП оснащены средствами автоматизации и контроля, которые позволяют оперативно отслеживать состояние системы и принимать меры для устранения нарушений.

Автоматизация технологических процессов (АТП) и автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) играют важную роль в современных системах теплоснабжения. АТП включает в себя применение различных технических средств и программного обеспечения для автоматического контроля и управления технологическими процессами. Автоматизация позволяет значительно повысить эффективность, надежность и безопасность работы систем теплоснабжения. АСУ ТП – это система, обеспечивающая сбор и обработку информации и выработку на основе полученной информации о технологическом процессе управляющих воздействий на объект управления в соответствии с установленными критериями управления [36].

Автоматизация тепловых пунктов в России и за рубежом включает в себя внедрение современных технологий для повышения эффективности и надежности теплоснабжения. ПАО «МОЭК» – московская объединенная энергетическая компания активно внедряет автоматизированные системы управления тепловыми пунктами. В 2022 году МОЭК модернизировала 500 тепловых пунктов, установив системы автоматизации, которые позволили снизить эксплуатационные затраты на 15 % и улучшить контроль за параметрами теплоносителя. ПАО «Т Плюс»: В 2021 году компания внедрила проект по автоматизации тепловых пунктов в Самаре, что позволило снизить потери тепла на 10 % и увеличить надежность теплоснабжения. В рамках проекта были установлены интеллектуальные системы управления, которые позволяют автоматически регулировать температуру и давление теплоносителя.

АО «Теплосеть Санкт-Петербурга»: компания успешно внедрила системы SCADA для управления тепловыми пунктами, что позволило улучшить мониторинг и управление сетью из более чем 5 000 км тепловых трубопроводов. В результате внедрения автоматизации удалось снизить количество аварийных ситуаций на 20 %.

АО «Сибирская генерирующая компания»: в Красноярске был реализован проект по автоматизации тепловых пунктов, включающий установку программируемых логических контроллеров (PLC) и систем дистанционного управления. Это позволило снизить эксплуатационные затраты на 12 % и увеличить энергоэффективность на 8 %.

АО «Теплоэнерго» (Нижний Новгород): компания внедрила автоматизированную систему управления тепловыми пунктами, что позволило оптимизировать режимы работы оборудования и снизить потребление энергии на 10 %.

В плане автоматизации активно работают такие зарубежные компании, как Vattenfall AB (Швеция), Danfoss Group (Дания), Engie (Франция), NRG Energy Inc. (США), Statkraft AS (Норвегия) и др. Использование интеллектуальных систем управления позволило снизить эксплуатационные затраты на 10–20 % и улучшить надежность теплоснабжения. Несмотря на преимущества автоматизации тепловых пунктов, существует множество технических и эксплуатационных проблем, с которыми приходится сталкиваться при внедрении автоматизированных систем управления: нелинейность исполнительных механизмов, их взаимовлияние, сложности пусконаладочных работ, потеря актуальности коэффициентов PID-регулятора и многое другое.

В настоящий момент в Сибирской генерирующей компании утверждена принципиальная схема автоматизации типового ЦТП для открытой (рис. 1) и закрытой (рис. 2) систем теплоснабжения [37].

Красноярская Теплосеть отвечает за эксплуатацию, обслуживание и ремонт тепловых сетей, обеспечивая надежное теплоснабжение для жителей и предприятий города. В зону обслуживания Красноярской тепловой сети также входят тепловые сети ООО «КрасКом» и ООО «КрасТЭК» (рис. 3). Общая протяженность тепловых сетей в однотрубном исполнении, включая муниципальные и бесхозные сети, – 2024,9 км. Всего на предприятии два района котельных, содержащие 9 котельных, и 6 районов тепловой сети, включающие в себя 104 ЦТП/КРП, 26 ПНС [38] (табл. 1 и 2).

Исходя из анализа литературных источников, целью настоящей работы является разработка современной системы АСУ ТП на базе SoftPLC с использованием нейросетевых регуляторов.

### Экспериментальные исследования

SoftPLC может работать с любыми модулями ввода-вывода, однако далеко не все модули имеют функционал фильтрации сигналов. Из-за несовершенства работы АЦП модулей, некачественного заземления, помех и других подобных причин получаемый цифровой сигнал требует дополнительной обработки.

В АСУТП применяют ряд простых, но эффективных типовых алгоритмов фильтрации, причем реализация этих алгоритмов может осуществляться как программным, так и аппаратным способом с помощью аналоговых устройств [39]. В ходе экспериментов были опробованы следующие фильтры:

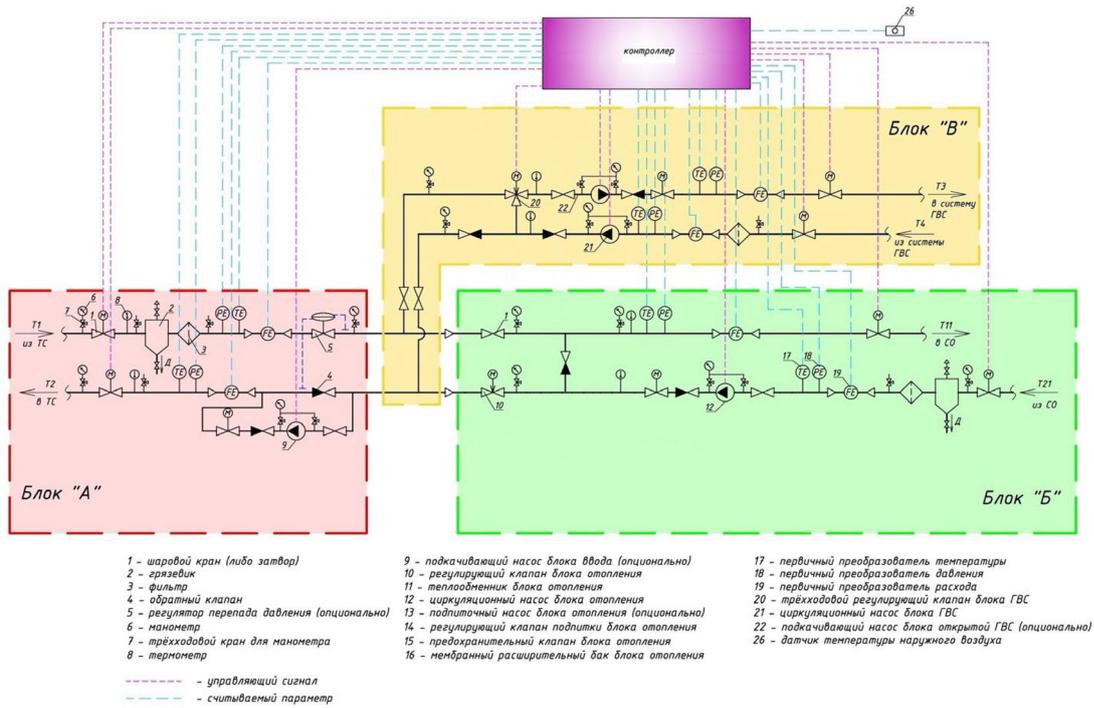


Рис. 1. Принципиальная схема автоматизации типового ЦТП для открытой системы теплоснабжения [37]

Fig. 1. Principal automation scheme of a typical district heating plant for an open heating system [37]

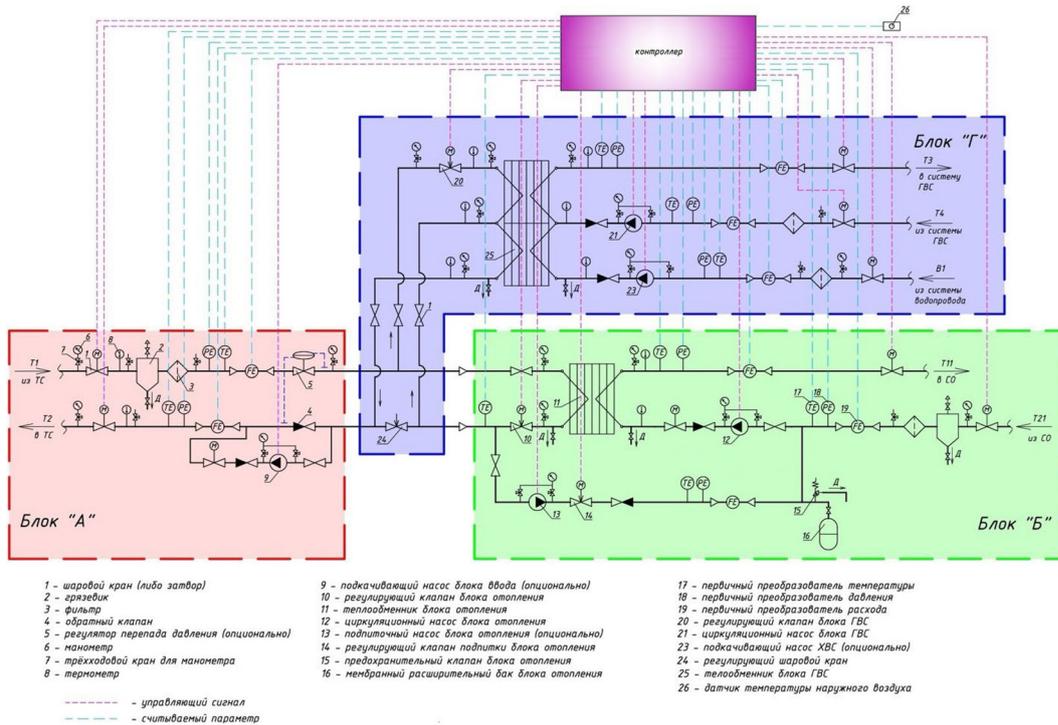


Рис. 2. Принципиальная схема автоматизации типового ЦТП для закрытой системы теплоснабжения [37]

Fig. 2. Circuit diagram of automation of a typical district heating plant for a closed heating system [37]

- Экспоненциальный фильтр;
- Фильтр скользящего среднего;
- Статистический фильтр;
- Фильтр Калмана;
- Фильтр бегущего среднего арифметического;
- Фильтр экспоненциального бегущего среднего;

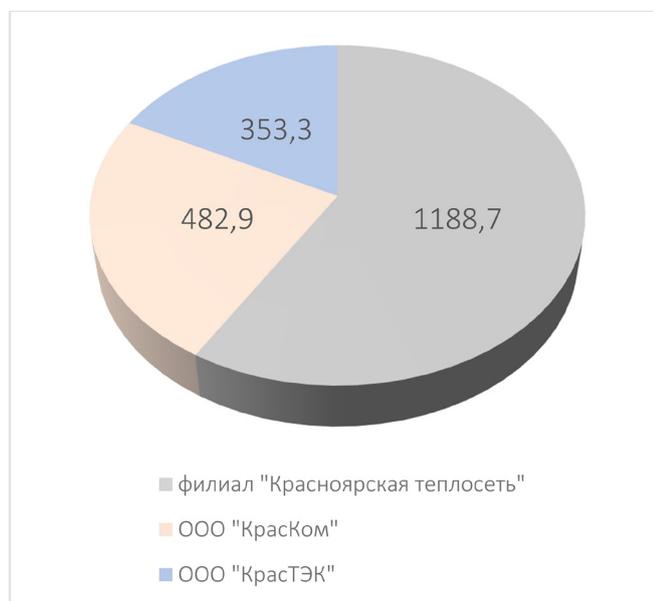


Рис. 3. Протяженность тепловых сетей, км [38]

Fig. 3. Length of heat networks, km [38]

Таблица 1

Table 1

Котельные				
№ п/п	Адрес	Тип топлива	Установленная мощность, Гкал/ч	Подключенная договорная нагрузка, Гкал/ч
<b>Район котельных №1</b>				
1	ул. Ленинградская, 44	электр	172,00	находится в резерве
2	ул.Крупской, 26	электр	145,00	находится в резерве
3	ул.Телевизорная, 1 стр 34	электр	2,40	в работе
			<b>319,40</b>	<b>0,00</b>
<b>Район котельных №2</b>				
1	ул. Калинина, 53,д	уголь	19,10	11,90
2	ул. Тотмина, 24г	уголь	88,50	96,41
3	ул. Лесная, 239 стр.5	уголь	6,00	8,02
4	ул. Лесная, 79 стр.1	уголь	0,99	1,28
5	ул. Е.Стасовой, 69а	уголь	2,80	1,49
6	ул. Норильская, 31 стр 3	уголь	41,10	44,81
			<b>158,49</b>	<b>163,91</b>
<b>9</b>			<b>477,89</b>	<b>163,91</b>

Таблица 2

Table 2

Тепловые сети, насосные станции, ЦТП/КРП								
Район тепловых сетей	Филиал Красноярская Теплосеть		КрасКом		КрасТЭК		ВСЕГО ПО ПРЕДПРИЯТИЮ	
	ЦТП/КРП, шт	ПНС, шт	ЦТП/КРП, шт	ПНС, шт	ЦТП/КРП, шт	ПНС, шт	ЦТП/КРП, шт	ПНС, шт
РТС-1	6	6	4	0	0	0	10	6
РТС-2	4	6	0	0	8	0	12	6
РТС-3	1	4	14	1	0	0	15	5
РТС-4	20	2	15	1	3	0	38	3
РТС-5	7	5	3	0	0	0	10	5
РТС-6	8	1	0	0	11	0	19	1
<b>ВСЕГО</b>	<b>46</b>	<b>24</b>	<b>36</b>	<b>2</b>	<b>22</b>	<b>0</b>	<b>104</b>	<b>26</b>

- Медианный фильтр;
- Фильтр экстремумов.

А также ряд специфических фильтров, например для фильтрации аудиошумов.

В итоге была выбрана двухступенчатая обработка сигнала, скользящее среднее и фильтр экстремумов. Такой выбор подходит для наших задач, так как он легкий для вычисления и дает незначительный сдвиг по времени, но при этом на выходе получается достойный результат (рис. 4).

В классическом PID-регуляторе используется только три параметра: уставка, обратная связь и управляющий сигнал. Это и является ключевой проблемой, которая при изменении обстоятельств приводит систему в неустойчивое состояние. Регулятор должен учитывать не только обратную связь (сигнал с датчика), но еще и положение всех регулирующих клапанов, признак работы и обороты всех насосов, а также сигналы со всех датчиков на объекте. Так как SoftPLC собственной разработки работает на языке программирования Python, то передача неопределенного числа аргументов в регулятор будет осуществляться через аргументы `*args` и `**kwargs`, что является отличным механизмом для решения поставленной задачи.

Если символ `*` будет использован внутри функции с параметром, произвольное количество позиционных аргументов сгруппируется в один кортеж. В следующем примере `args` является кортежем параметров, который был создан из нуля или более аргументов, переданных в функцию `print_args()`:

```
>>> def print_args(*args):
...     print('Positional argument tuple:', args)
... 
```

Если вы вызовете функцию без аргументов, то получите пустой кортеж:

```
>>> print_args()
Positional argument tuple: ()
```

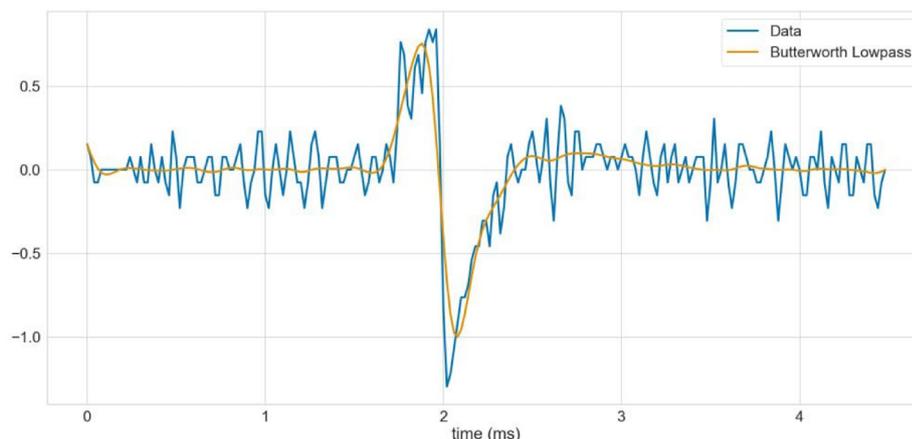


Рис. 4. Фильтрация сигнала

Fig. 4. Signal filtering

Все аргументы, которые вы передадите, будут выведены на экран как кортеж args:

```
>>> print_args(3, 2, 1, 'wait!', 'uh...')
Positional argument tuple: (3, 2, 1, 'wait!', 'uh...')
```

Если в вашей функции имеются также обязательные позиционные аргументы, поместите их в начало – \*args отправится в конец списка и получит все остальные аргументы:

```
>>> def print_more(required1, required2, *args):
...     print('Need this one:', required1)
...     print('Need this one too:', required2)
...     print('All the rest:', args)
...
>>> print_more('cap', 'gloves', 'scarf', 'monocle', 'mustache wax')
Need this one: cap
Need this one too: gloves
All the rest: ('scarf', 'monocle', 'mustache wax')
```

Вы можете использовать два астериска (\*\*), чтобы сгруппировать аргументы – ключевые слова в словарь, где имена аргументов станут ключами, а их значения – соответствующими значениями в словаре. В следующем примере определяется функция print\_kwargs(), в которой выводятся ее аргументы – ключевые слова:

```
>>> def print_kwargs(**kwargs):
...     print('Keyword arguments:', kwargs)
...

```

В функцию можно передать несколько аргументов:

```
>>> print_kwargs()
Keyword arguments: {}
>>> print_kwargs(wine='merlot', entree='mutton', dessert='macaroon')
Keyword arguments: {'dessert': 'macaroon', 'wine': 'merlot', 'entree': 'mutton'}
```

Внутри функции kwargs является параметром-словарем [40].

Таким образом, найден механизм передачи в функцию-регулятор неопределённого количества параметров, которые необходимо учитывать при расчете управляющего сигнала на исполнительный механизм.

Все объекты тепловой сети являются разными, даже объекты, построенные по типовому проекту, отличаются друг от друга. Отличия могут заключаться в применяемом оборудовании, степени износа сетей и механизмов, параметрах теплоисточника и потребителей. Следовательно, исключается возможность клонирования уже обученной нейросети. Нейросеть должна обучаться самостоятельно на конкретном объекте.

Изучение и использование искусственных нейронных сетей, в принципе, началось уже достаточно давно – в начале 20 века, но широкую известность они получили несколько позже. Связано это в первую очередь с тем, что стали появляться продвинутые (для того времени) вычислительные устройства, мощности которых были достаточно велики для работы с искусственными нейронными сетями. По сути, на данный момент можно легко смоделировать нейронную сеть средней сложности на любом персональном компьютере.

Нейронная сеть представляет собой совокупность нейронов, соединенных друг с другом определенным образом. Рассмотрим один нейрон (рис. 5).

Нейрон представляет собой элемент, который вычисляет выходной сигнал (по определенному правилу) из совокупности входных сигналов. То есть основная последовательность действий одного нейрона такая:

- Прием сигналов от предыдущих элементов сети;
- Комбинирование входных сигналов;
- Вычисление выходного сигнала;
- Передача выходного сигнала следующим элементам нейронной сети.

Между собой нейроны могут быть соединены абсолютно по-разному, это определяется структурой конкретной сети. Но суть работы нейронной сети остается всегда одной и той же. По совокупности поступающих на вход сети сигналов на выходе формируется выходной сигнал (или несколько выходных сигналов). То есть нейронную сеть упрощенно можно представить в виде черного ящика, у которого есть входы и выходы. А внутри этого ящика сидит огромное количество нейронов.

В многослойных (слоистых) нейронных сетях нейроны объединяются в слои. Слой содержит совокупность нейронов с едиными входными сигналами. Число нейронов в слое может быть любым и не зависит от количества нейронов в других слоях. В общем случае сеть состоит из слоев, пронумерованных слева направо. Внешние входные сигналы подаются на входы нейронов входного слоя (его часто нумеруют как нулевой), а выходами сети являются выходные сигналы последнего слоя. Кроме входного и выходного слоев в много-

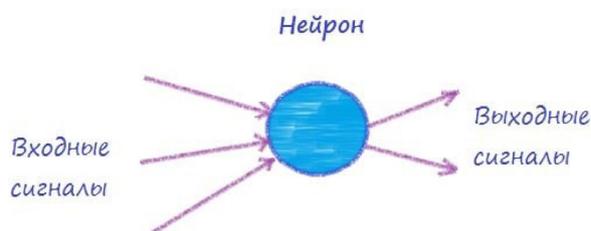


Рис. 5. Одиночный нейрон

Fig. 5. Single neuron

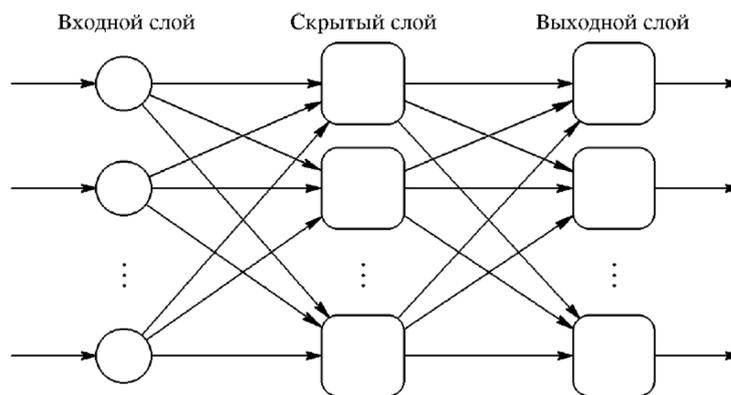


Рис. 6. Схема связей многослойной нейронной сети

Fig. 6. Link diagram of a multilayer neural network

слойной нейронной сети есть один или несколько скрытых слоев. Связи от выходов нейронов некоторого слоя  $q$  к входам нейронов следующего слоя ( $q + 1$ ) называются последовательными [41].

Нейросети сильно отличаются по своим задачам, архитектуре, а следовательно, и по требуемым вычислительным ресурсам. SoftPLC, используемые для задач АСУ ТП, представляют собой промышленный безвентиляторный ПК, устанавливаемый в шкафу ПТК (программно-технический комплекс), рис. 7.

Для того чтобы SoftPLC могли составлять конкуренцию классическим контроллерам, они должны быть недорогими и надежными, поэтому в их конструкции отсутствуют вращающиеся элементы и используется маломощная компонентная база. TDP применимых процессоров редко превышает 40 Вт, так как существует проблема эффективного отвода тепла в закрытом шкафу. Общая вычислительная способность промышленных компьютеров ниже обычных бытовых компьютеров. Этот факт накладывает дополнительные ограничения на выбор архитектуры нейросети. В процессе регулирования может использоваться несколько нейросетей, поэтому необходимо применять относительно простую архитектуру с низкими требованиями к вычислительной мощности промышленного ПК.

Путем многократных экспериментов для наших задач была выбрана архитектура, состоящая из входных слоев, трех полносвязных скрытых слоев и одного выходного слоя. Количество



Рис. 7. Промышленный безвентиляторный ПК

Fig. 7. Industrial fanless PC

нейронов во входном слое равно количеству параметров, передаваемых в качестве аргументов в нейрорегулятор, 64 нейрона в первом скрытом слое, 32 нейрона во втором скрытом слое, 16 нейронов в третьем скрытом слое и один нейрон в выходном слое. В результате на выходе получается выходное управляющее воздействие на исполнительный механизм.

Такая модель оказалась оптимальным балансом между скоростью, точностью и низкой вычислительной мощностью.

Для создания нейрорегулятора будет использоваться фреймворк PyTorch для языка Python. PyTorch – это фреймворк машинного обучения с открытым исходным кодом, который позволяет создавать нейронные сети и эффективно их обучать. Однако PyTorch – не единственный фреймворк такого рода. Альтернативами PyTorch являются TensorFlow/Keras (<https://www.tensorflow.org/>), JAX (<https://github.com/google/jax>). Фреймворк PyTorch имеет огромное сообщество разработчиков и особенно часто используется в научных исследованиях [42].



Рис. 8. Внешний вид испытательного стенда

Fig. 8. External view of the test bench

Для обучения нейросети в любом случае требуется база данных. После строительства или реконструкции теплового пункта базы данных быть не может, поэтому необходимо отталкиваться от того, что нейрорегулятор должен работать с нуля и обучаться уже в процессе. Для решения этой задачи было опробовано несколько моделей и проведен ряд экспериментов на испытательном стенде (рис. 8).

Самым оптимальным вариантом стало использование на начальном этапе двух параллельно работающих регуляторов: адаптивный PID-регулятор и нейрорегулятор. Адаптивный PID – это классический PID-регулятор с динамической настройкой коэффициентов, он осуществляет первоначальное регулирование и накопление данных для обучения нейросети. Так как цена ошибки на реальных объектах очень высока и права на ошибку нету, то управление на нейрорегулятор переходит постепенно, и спустя время управление полностью переходит на нейрорегулятор. На начальном этапе оба регулятора считают выходной управляющий сигнал, нейросеть постепенно обучается,

и когда сходимость полученных решений от обоих регуляторов превышает 80 % (параметр настраиваемый) – управление переходит на нейрорегулятор. В случае возникновения ситуации, с которой нейросеть ранее не сталкивалась, она может ошибаться, в таком случае расхождение решений регуляторов становится существенным и на исполнительный механизм идет управляющий сигнал с PID-регулятора. В случае повторного возникновения похожей ситуации, нейрорегулятор уже безошибочно выдаст управляющее воздействие. Таким образом, со временем управление полностью переходит на нейрорегулятор.

По результатам экспериментов нейросеть без страхующего адаптивного PID-регулятора на начальных этапах могла значительно ошибаться и выдавать некорректное управляющее воздействие, но со временем она училась и таких ошибок больше не совершала. Существует множество задач, где подобные ошибки некритичны, но в тепловых сетях это недопустимо, поэтому использование для безопасности страхующего PID-регулятора полностью оправдано.

### **Объект исследования**

Для реализации предложенных идей был выбран центральный тепловой пункт № 1 Красноярской тепловой сети по адресу: г. Красноярск ул. 9 Мая, 56 Б. Объект довольно старый, на нем присутствует часть неиспользуемого оборудования, запорная и запорно-регулирующая арматура имеет приличный износ и люфты. Частотный преобразователь также на исходе своего ресурса, при фиксированном задании обороты двигателя немного «плавают». Эти обстоятельства дополнительно усложняют задачу, но такие объекты существуют и являются «жизненными», с ними тоже нужно уметь работать. Существующая АСУ ТП вышла из строя. Поэтому было принято решение заменить сломанный контроллер на промышленный безвентиляторный сенсорный ПК, а модули ввода-вывода на новые и опробовать работу новой системы. Технологическая схема объекта приведена на рис. 9, а внешний вид на рис. 10.

Для удобства разработки и отладки программного обеспечения для SoftPLC был разработан Web-интерфейс. Используемый стек технологий: Django, HTML, CSS, JavaScript. По протоколу Modbus TCP было подключено два модуля ввода-вывода, по протоколу Modbus RTU подключен преобразователь частоты.

Так как нет возможности искусственно повлиять на параметры теплоисточника или потребителя, было принято решение выводить систему из равновесия изменением уставок регуляторов. Пределы изменения уставок должны быть максимально большими, но при этом безопасными. Сначала изменять уставки поочередно на каждом регуляторе, потом попарно, а потом всех трех одновременно. Для проведения испытаний были выбраны 2 рабочих дня с одинаковыми погодными условиями, один день испытания проводились с использованием классических PID-регуляторов, второй день с использованием нейросетевых регуляторов. Кроме принципа регулирования остальные условия были максимально схожими. На рис. 11 приведена циклограмма испытаний.

### **Обсуждение результатов исследования**

Объект был введен в эксплуатацию 15.09.2023 г., а эксперимент проводился 15 и 16 марта 2024 г., следовательно, до начала эксперимента объект на SoftPLC отработал 7 месяцев. Все это время объект находился под пристальным наблюдением, работал в диапазоне температур

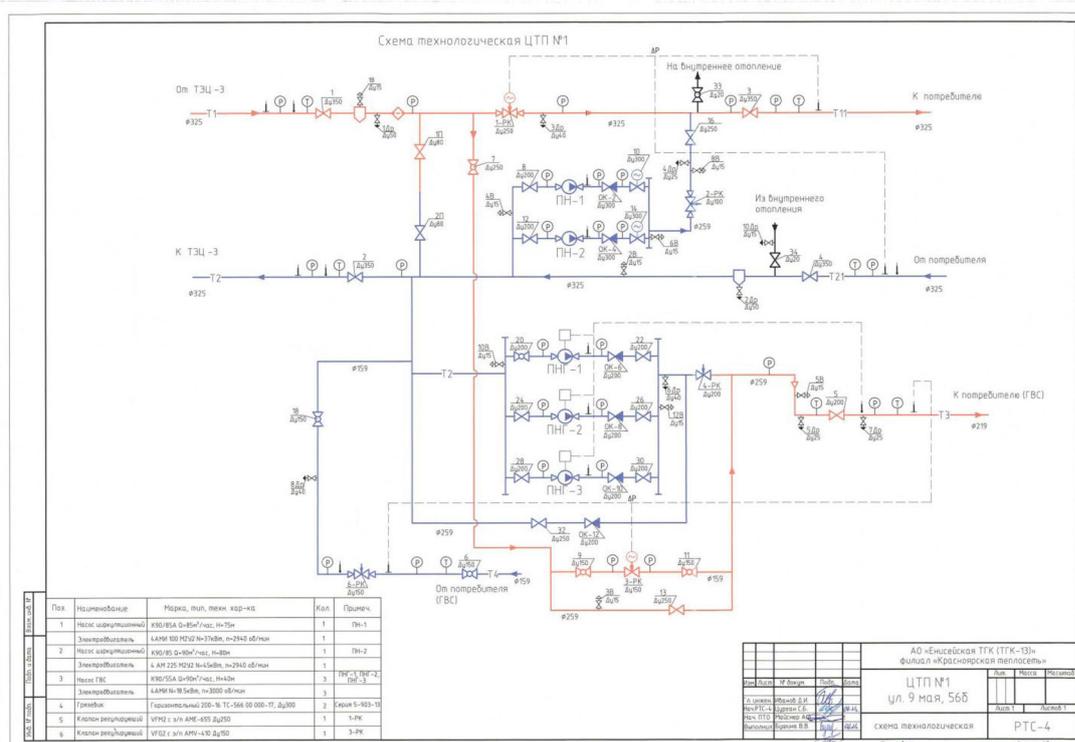


Рис. 9. Технологическая схема ЦТП № 1

Fig. 9. Technological scheme of the central heating plant No. 1

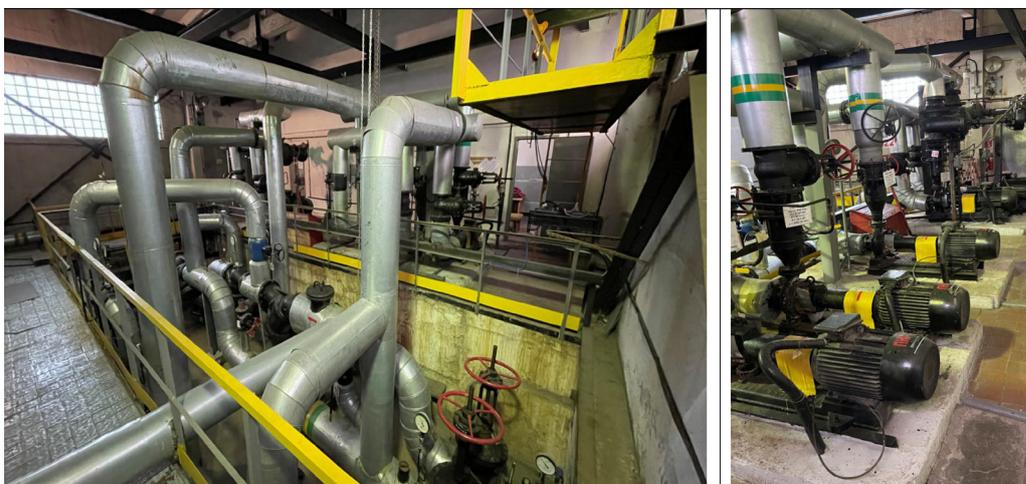


Рис. 10. Внешний вид теплового пункта

Fig. 10. External view of the heating station

№ Этапа цикла	Цикл 1															Цикл 2															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Время от начала	0:00:00	0:14:00	0:28:00	0:42:00	0:56:00	1:10:00	1:24:00	1:38:00	1:52:00	2:06:00	2:20:00	2:34:00	2:48:00	3:02:00	3:16:00	3:30:00	3:44:00	3:58:00	4:12:00	4:26:00	4:40:00	4:54:00	5:08:00	5:22:00	5:36:00	5:50:00	6:04:00	6:18:00	6:32:00	6:46:00	7:00:00
$\Delta_{T11T21}$	2,2	1,5	2,5					1,5	2,5	1,5	2,5			1,5	2,5	2,2	1,5	2,5					1,5	2,5	1,5	2,5			1,5	2,5	2,2
$\Delta_{T3T4}$	1,7			2,5	1,5			2,5	1,5			1,5	2,5	1,5	2,5	1,7			2,5	1,5			2,5	1,5			1,5	2,5	1,5	2,5	1,7
$T_{T3}$	65					75	60			75	60	75	60	75	60	65					75	60			75	60	75	60	75	60	65

Рис. 11. Циклограмма испытаний

Fig. 11. Test cyclogram

наружного воздуха от  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На основании наблюдений можно сделать следующие выводы.

- SoftPLC работает на несколько порядков быстрее. Цикл дорогих программируемых промышленных контроллеров составляет десятки/сотни миллисекунд, цикл недорогих контроллеров может достигать секунд. Цикл работы SoftPLC десятки/сотни микросекунд. Давление является быстро изменяемым параметром, который может меняться скачкообразно, такая скорость работы SoftPLC положительно сказывается на скорости и точности регулирования даже с применением PID-регулятора.

- Снижение трафика обмена данными с системой диспетчерского контроля и управления АСУ ТП Красноярской теплосети построено преимущественно на контроллерах Siemens, связь с верхним уровнем осуществляется по протоколу S7 через мобильную сеть 4G циклическим методом с периодом от 100 мс. SoftPLC связывается с системой диспетчерского контроля и управления по протоколу OPC UA, который поддерживает систему подписок на переменные, то есть переменные передаются только в случае их изменения. Средний трафик за месяц объектов подобного уровня с контроллерами Siemens составляет порядка 10 ГБ, а трафик SoftPLC около 1,5 ГБ. Снижение объема передаваемых данных в 6–7 раз также положительно сказалось на скорости передачи и точности логирования и архивирования в системе диспетчерского контроля и управления.

За семь месяцев работы нейросеть обучилась, страховочный адаптивный PID-регулятор работал крайне редко. При этом основное обучение нейросеть прошла буквально за первые дни работы. Основным преимуществом для инженера было отсутствие необходимости какой-либо настройки, все происходит автоматически.

В ходе самого эксперимента архивировались все основные параметры по каждому регулятору, в результате были получены массивные Excel таблицы свешу 300 тысяч строк. На всех графиках синим цветом изображена уставка регулирования, красным – обратная связь от датчика, зеленым – выходной управляющий сигнал на исполнительный механизм (см. рис. 12 и 13).

В целом оба регулятора справились с испытанием. PID-регулятор управлял регулирующим клапаном в большем диапазоне, нейрорегулятор совершал меньше перемещений и в меньшем диапазоне. При более детальном рассмотрении полученных результатов видим, что в начале испытаний, когда уставка менялась только на этом параметре, графики очень схожие

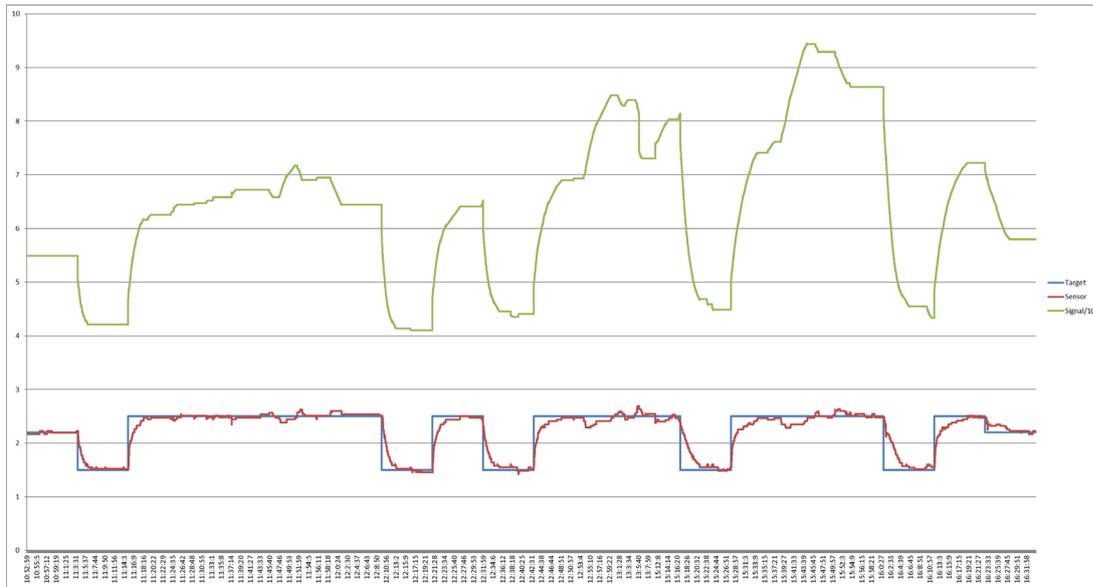


Рис. 12. Результат регулятора  $\Delta\_T11T21$  с PID-регулятором

Fig. 12. Result of the regulator  $\Delta\_T11T21$  with PID-regulator

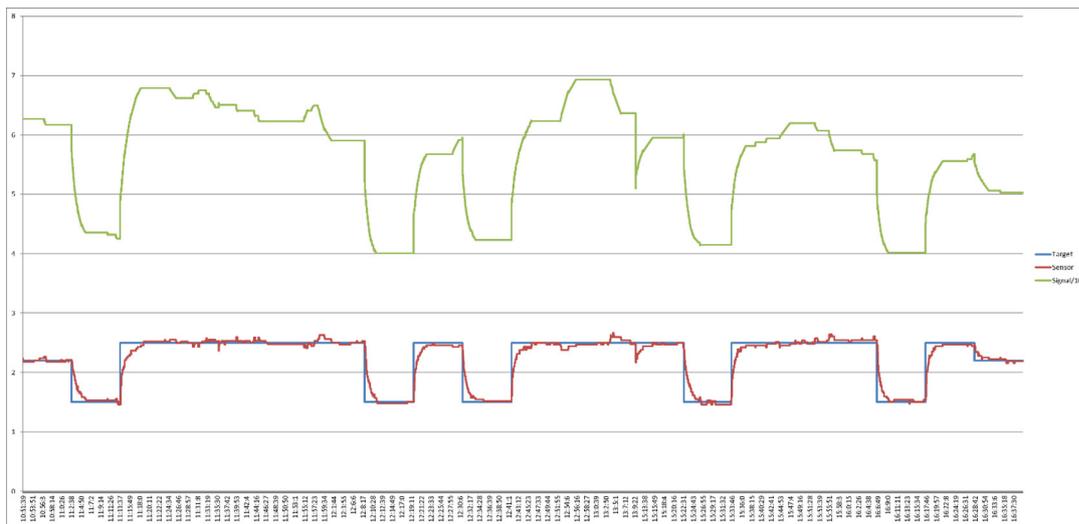


Рис. 13. Результат регулятора  $\Delta\_T11T21$  с нейросетевым регулятором

Fig. 13. Result of the  $\Delta\_T11T21$  controller with neural network controller

(рис. 14). Когда уставки регуляторов начали меняться попарно, появилось взаимовлияние двух регуляторов (рис. 15).

Тут уже начинает проявляться преимущество нейрорегулятора – видно, что скорость и точность переходных процессов выше. Удержание параметра на заданной уставке у нейрорегулятора получается лучше, хотя тоже неидеально, так как это были новые условия для нейросети, но главное, что в этот момент нейросеть обучалась.



Рис. 14. Графики переходных процессов обоих регуляторов при изменении одной уставки

Fig. 14. Transient plots of both regulators when changing one set point

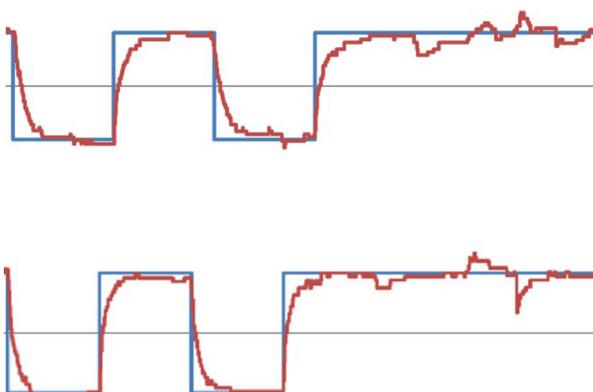


Рис. 15. Графики переходных процессов обоих регуляторов при попарном изменении уставок

Fig. 15. Transient plots of both regulators at pair change of setpoints

Регулирование температуры является наиболее сложным процессом по следующим причинам:

- большая инерционность процесса. В трубе установлена гильза, заполненная маслом, а в гильзе установлен датчик. Процесс смешения, нагрева, охлаждения занимает много времени. Для таких задач в PID-регуляторе интегральный коэффициент настраивается достаточно большим, порядка 120 с;
- процесс регулирования температуры ГВС напрямую зависит от температуры в подающем и обратном трубопроводе. Когда эта разница большая, регулирование осуществляется более точно и быстро, но весной и осенью задача усложняется, клапану необходимо сильно изменять свое положение для изменения температуры даже на 1 °С.

На рис. 16 и 17 представлены результаты для регулятора T\_T3.

Как видно из графиков, оба регулятора плохо, но справились с задачей: во-первых – это частая проблема в тепловых сетях в теплый период времени. Как видно, еще до начала испытаний PID-регулятор имел автоколебания, процесс был несходящийся – это видно по характерной «пиле» с датчика положения клапана и синусоидально изменяющейся температуре. Во-

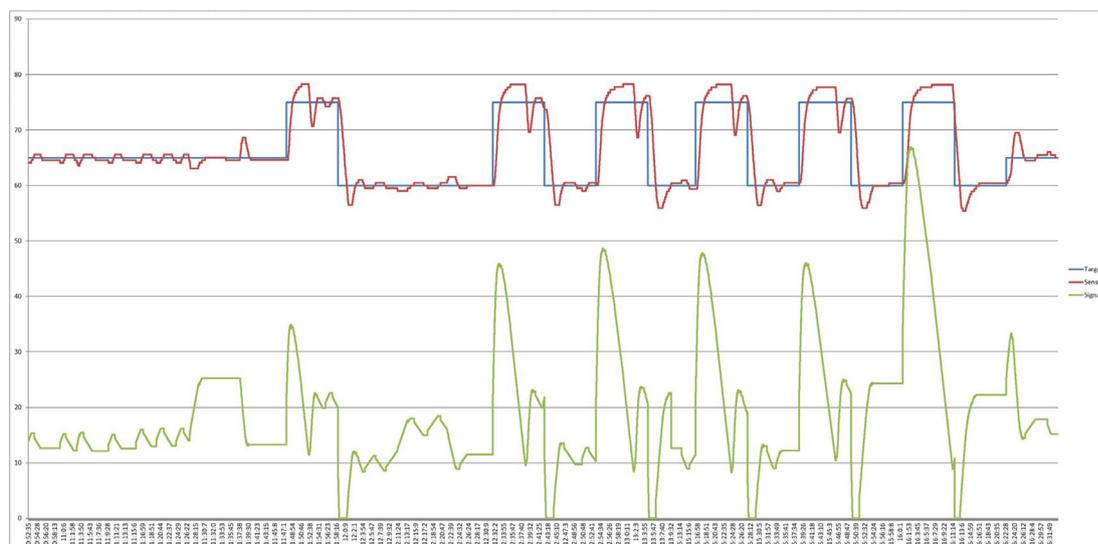


Рис. 16. Результат регулятора T\_T3 с PID-регулятором

Fig. 16. Result of T\_T3 controller with PID controller

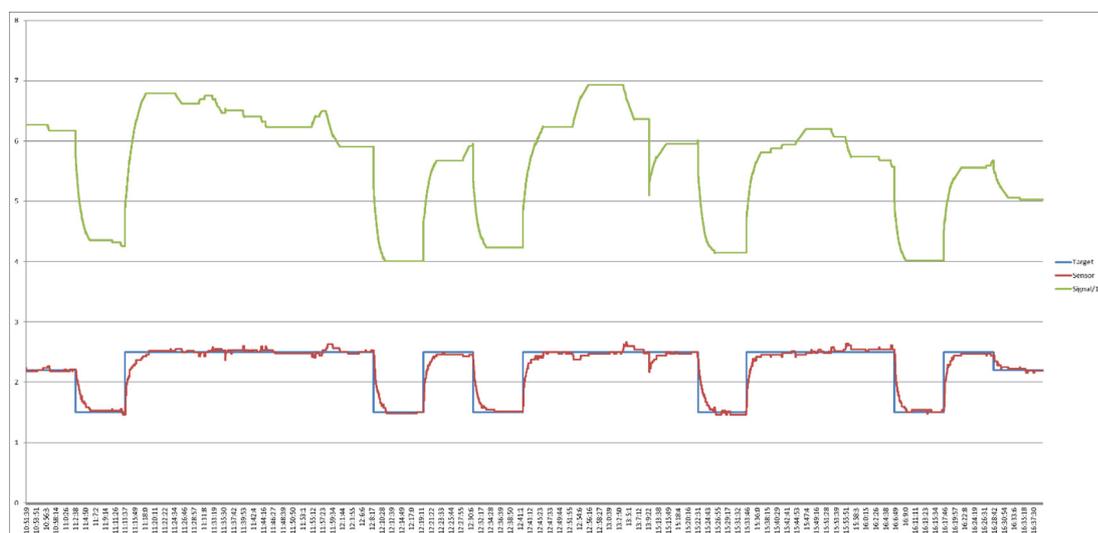


Рис. 17. Результат регулятора T\_T3 с нейросетевым регулятором

Fig. 17. Result of T\_T3 controller with neural network controlle

вторых, температура ГВС – это параметр, который со временем изменять нет необходимости, как правило, температура настраивается один раз и весь ОЗП не меняется. Это привело к тому, что нейросеть научилась держать этот параметр, но не научилась его изменять, так как не было достаточного количества переходных процессов для обучения. Как видно, положение клапана было статично, температура постоянна, никаких колебаний не было.

Поэтому испытания проходили на общих основаниях для обоих регуляторов, и нейросеть в первый раз решала эту задачу, часто подключался страхующий адаптивный PID-регулятор.

Первичные колебания температуры обоих регуляторов имели соизмеримую амплитуду, но вторичные колебания у нейросетевого регулятора были значительно меньше. Более того, нейрорегулятор намного бережней управлял клапаном, он перемещался в диапазоне 0–27 %, а PID-регулятор изменял положение клапана в диапазоне 0–66 %. График положения клапана у нейрорегулятора более плавный. Каждый переходный процесс PID-регулятор совершал абсолютно одинаково, графики полностью идентичны, а нейрорегулятор каждый переходный процесс совершал немного по-разному, что свидетельствует о процессе обучения. Поэтому нейрорегулятор все же показал себя лучше классического PID-регулятора.

### Выводы

Если комплексно оценить итоги испытаний, то можно констатировать – нейросетевой регулятор тотально превосходит PID-регулятор по всем показателям, но реализовать такое регулирование очень сложно и невозможно на классических аппаратных контроллерах.

Скорость, точность, адаптивность – это главные плюсы нейрорегулятора, которые обеспечивают стабильный технологический процесс в любых условиях с минимальными затратами энергоресурсов.

### Список литературы / Referencess

- [1] Пырков В.В. *Современные тепловые пункты. Автоматика и регулирование*. К.: И ДП. Такі справи., 2007. 252 с. [Pyrkov V.V. *Modern heat points. Automation and regulation*. K.: И ДП. Такі справи., 2007. 252 p. (In Rus.)].
- [2] Горинов Ю. А., Анисимов П. Н. Повышение эффективности систем централизованного теплоснабжения модернизацией ИТП. *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2022. Т. 24. № 3. 101–111. doi:10.30724/19989903–2022–24–3–101–111 [Gorinov Yu.A., Anisimov P.N. Efficiency increase of the centralized heat supply systems by modernization of ITP. *Izvestiya vuzov. Problems of energetics*. 2022. Т. 24. № 3. 101–111. doi:10.30724/19989903–2022–24–3–101–111 (In Rus.)].
- [3] Выдержки из Информационно-аналитического доклада ФГБУ «Российское энергетическое агентство» Минэнерго России, Москва, 2018 г. Теплоэнергетика и централизованное теплоснабжение России в 2015–2016 годы. *Новости теплоснабжения*. 2018. № 3(211). 8–17 [Excerpts from the Information and Analytical Report of FGBU “Russian Energy Agency” of the Ministry of Energy of Russia, Moscow, 2018 Heat power engineering and centralized heat supply in Russia in 2015–2016. *Heat Supply News*. 2018. № 3(211). 8–7 (In Rus.)].
- [4] Семенов В.Г. *Стратегия развития теплоснабжения и когенерации в Российской Федерации до 2025 года*, [https://www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_shablon.php?id=3140](https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=3140) [Semenov V.G. *Strategy of development of heat supply and cogeneration in the Russian Federation until 2025*, [https://www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_shablon.php?id=3140](https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=3140) (In Rus.)].
- [5] Косой А. А. *Выбор оптимальной структуры интеллектуальной АСУ ТП ТЭС на базе ПТК*. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 2021. 25 с. [Kosoy A.A. *Selection of the optimal structure of intellectual ACS TPP TPP on the basis of PTC*. Avtoref. diss. ... Cand. of technical sciences. MOSCOW: MPEI, 2021. 25 с. (In Rus.)].
- [6] Аракелян Э. К., Косой А. А. Особенности работы ПГУ в режимах регулирования нагрузки энергосистемы. *Новое в российской энергетике*. 2020. № 2 [Arakelyan E. K., Kosoy A. A. Features

of CSCP operation in modes of power system load regulation. *Novoe v rossiyskaya energetika*. 2020. № 2 (In Rus.).

[7] Аракелян Э. К., Калинина Я. В., Косой А. А., Хохлов И. С. Информационная безопасность АСУ ТП: текущее состояние, проблемы и сложности ее реализации. *Новое в российской энергетике*. 2017. № 3 [Arakelyan E. K., Kalinina Y. V., Kosoy A. A., Khokhlov I. S. Information security of ACS TP: current state, problems and difficulties of its realization. *Novoe v russian energetika*. 2017. № 3 (In Rus.).]

[8] Нежметдинов Р. А. *Принципы и методологические основы построения программных систем логического управления технологическим оборудованием*. Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. Самара: СГТУ, 2020. 46 с. [Nezhmetdinov R. A. *Principles and methodological foundations of building program systems of logical control of technological equipment*. Avtoref. diss. ... doctor of technical sciences. Samara: SSTU, 2020. 46 с. (In Rus.).]

[9] Жуков Д. В. *Повышение эффективности систем централизованного теплоснабжения при формировании диспетчерского графика тепловых нагрузок с учетом нестационарных процессов*. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Красноярск: Изд-во «Гротеск», 2013. 20 с. [Zhukov D. V. *Efficiency increase of the centralized heat supply systems at formation of the dispatching schedule of the heat loads taking into account the non-stationary processes*. Avtoref. diss. ... Cand. of Technical Sciences. Krasnoyarsk: Izd-vo Grotesk, 2013. 20 pp. (In Rus.).]

[10] Жуков Д. В. Математическое моделирование в задачах диспетчерского управления тепловыми режимами систем централизованного теплоснабжения. *В мире научных открытий*. 2010. № 4(10). Ч. 13. 124–126 [Zhukov D. V. Mathematical modeling in tasks of dispatch control of thermal modes of centralized heat supply systems. *In the world of scientific discoveries*. 2010. № 4(10). Ч. 13. 124–126 (In Rus.).]

[11] Лебедев В. М., Дмитриев В. З., Жуков Д. В., Побегаяева Г. А. Факторы, влияющие на потери тепловой энергии и теплоносителя в открытых системах теплоснабжения. *Промышленная энергетика*. 2010. № 11. 28–32 [Lebedev V. M., Dmitriev V. Z., Zhukov D. V., Pobegaeva G. A. Factors influencing on losses of thermal energy and heat carrier in open systems of heat supply. *Promyshlennaya Energetika*. 2010. № 11. 28–32 (In Rus.).]

[12] Тун М. М. Нейросетевые алгоритмы прогнозирующего управления в автоматизированных сварочных комплексах. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. 18 с. [Tun M. M. *Neural network algorithms of predictive control in the automated welding complexes*. Avtoref. diss. ... Cand. of technical sciences. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2016. 18 с. (In Rus.).]

[13] Денисова Л. А. *Многокритериальная оптимизация и повышение стабильности показателей качества систем управления объектами теплоэнергетики*. Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. Сургут: СГУ, 2015. 44 с. [Denisova, L. A. *Multicriteria optimization and increase of stability of quality indicators of control systems of heat power engineering objects*. Avtoref. diss. ... doctor of technical sciences. Surgut: SGU, 2015. 44 с. (In Rus.).]

[14] Лукьянов Н. Д. *Параметрическая оптимизация автоматических систем стабилизации с помощью генетического алгоритма*. Дисс. ... канд. техн. наук. Иркутск: ИрГТУ, 2014. 152 с. [Lukyanov N. D. *Parametric optimization of automatic stabilization systems with the help of genetic algorithm*. Diss. ... kand. tehn. nauk. Irkutsk: IrSTU, 2014. 152 с. (In Rus.).]

- [15] Цыпкин Я. З. *Основы теории автоматических систем*. М.: Наука, 1977. 560 с. [Tsypkin Ya. Z. *Fundamentals of the theory of automatic systems*. Moscow: Nauka, 1977. 560 pp. (In Rus.)].
- [16] Растрингин Л. А. *Адаптация сложных комплексов*. Рига: Зинатне, 1981. 375 с. [Rastrigin L. A. *Adaptation of complex*. Riga: Zinatne, 1981. 375 с. (In Rus.)].
- [17] *Методы классической и современной теории автоматического управления: Т. 3: Синтез регуляторов систем автоматического управления*; ред. К. А. Пупков и Н. Д. Ергупов. М.: Издво МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 616 с. [*Methods of classical and modern theory of automatic control: Vol. 3: Synthesis of regulators of automatic control systems*; ed. by K. A. Pupkov and N. D. Ergupov. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2004. 616 с. (In Rus.)].
- [18] Ротач В. Я. *Расчет динамики промышленных систем регулирования*. М.: Энергия, 1973. 440 с. [Rotach V. Ya. *Calculation of dynamics of industrial regulation systems*. Moscow: Energia, 1973. 440 pp. (In Rus.)].
- [19] Штейнберг Ш. Е., Хвилевичкий Л. О., Ястребенский М. А. *Промышленные автоматические регуляторы*; ред. Е. П. Стефан. М.: Энергия, 1973. 568 с. [Shteinberg S. E., Khvilevitsky L. O., Yastrebensky M. A. *Industrial automatic regulators*; ed. by E. P. Stefan. Moscow: Energia, 1973. 568 с. (In Rus.)].
- [20] Плюто В. П. *Практикум по теории автоматического регулирования химико-технологических процессов*; ред. В. В. Кафаров. М.: Химия, 1969. 114 с. [Plutto V. P. *Practicum on the theory of automatic regulation of chemical-technological processes*; ed. by V. V. Kafarov. Moscow: Khimiya, 1969. 114 с. (In Rus.)].
- [21] Костюк В. И., Широков Л. А. *Автоматическая параметрическая оптимизация систем регулирования*. М.: Энергоиздат, 1981. 96 с. [Kostyuk V. I., Shirokov L. A. *Automatic parametric optimization of regulation systems*. Moscow: Energoizdat, 1981. 96 с. (in Russian)].
- [22] Ким Д. П. *Теория автоматического управления. В 2 т. Т. 1. Линейные системы*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 288 с. [Kim D. P. *Theory of automatic control. In 2 vol. T.1. Linear systems*. М.: FIZMATLIT, 2003. 288 с. (In Rus.)].
- [23] Ротач В. Я. *Расчет динамики промышленных систем регулирования*. М.: Энергия, 1973. 440 с. [Rotach V. Ya. *Calculation of dynamics of industrial regulation systems*. Moscow: Energia, 1973. 440 с. (In Rus.)].
- [24] Holland J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*. Cambridge: MIT Press, 1992. 228 p.
- [25] Holland J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. The University of Michigan Press, University of Michigan, Ann Arbor, 1975 211 p.
- [26] De Jong K. A. *Evolutionary computation a unified approach*. Cambridge: A Bradford book, 2006. 256 p.
- [27] Goldberg, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Boston: Addison-Wesley Longman, 1989. 372 p.
- [28] Haupt R. L., Haupt S. E. *Practical Genetic Algorithm*. Hoboken: Published by John Wiley & Sons, 2004. 252 p.
- [29] Вороновский. Г. К., Махотило К. В., Петрашев С. Н., Сергеев С. А. *Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности*. Харьков: ОСНО-

BA, 1997. 112 с. [Voronovsky. G.K., Mahotilo K. V., Petrashev S. N., Sergeev S. A. *Genetic algorithms, artificial neural networks and problems of virtual reality*. Kharkov: OSNOVA, 1997. 112 с. (In Rus.)].

[30] Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. *Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы*: пер. с польск. И.Д. Рудинского. М.: Горячая линия – Телеком, 2006. 452 с. [Rutkowska D., Pilinski M., Rutkowski L. *Neural Networks, Genetic Algorithms and Fuzzy Systems*: per. s polsk. I.D. Rudinsky. Moscow: Hot Line – Telecom, 2006. 452 с. (In Rus.)].

[31] Курейчик В.М. *Генетические алгоритмы и их применение*. изд. 2-е, доп. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2002. 242 с. [Kureichik V.M. *Genetic algorithms and their application*. ed. 2nd, supplement. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2002. 242 с. (In Rus.)].

[32] Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И. Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации в управлении. *Exponenta Pro*, 2004. № 3–4(7–8) [Sabanin V.R., Smirnov N.I., Repin A.I. Modified genetic algorithm for optimization problems in management. *Exponenta Pro*, 2004. № 3–4(7–8) (In Rus.)].

[33] Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И. Оптимизация настроечных параметров регулирующих устройств в АСР. *Сб. тр. Конф. Control 2003*. М.: Изд-во МЭИ, 2003 [Sabanin V.R., Smirnov N.I., Repin A.I. Optimization of tuning parameters of regulating devices in ACR. *Proc. of Conf. Control 2003*. Moscow: MPEI Publishing House, 2003 (In Rus.)].

[34] Репин А.И., Смирнов Н.И., Сабанин В.Р. Алгоритм оптимальной настройки реальных ПИДрегуляторов на заданный запас устойчивости. *Автоматизация и ИТ в энергетике*. 2010. № 4(9). 7–12 [Repin, A.I.; Smirnov, N.I.; Sabanin, V.R. Algorithm of an optimum adjustment of real PID-regulators on a given stability margin. *Automation and IT in power engineering*. 2010. № 4(9). 7–12 (In Rus.)].

[35] Авдюнин Е.Г. *Тепловые сети и тепловые пункты*. М.: Инфра-Инженерия, 2019. 299 с. [Avdyunin E. G. *Teplovye neti and heat points*. Moscow: Infra-Engineering, 2019. 299 с. (In Rus.)].

[36] Ефимов С.В., Пушкарев М.И., Фадеев А.С. *Программное обеспечение автоматизированных систем управления технологическими процессами*. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2020. 128 с. [Efimov S. V., Pushkarev M. I., Fadeev A. S. *Software for automated control systems of technological processes*. Tomsk: Izd-vo Tomsk Polytechnic University, 2020. 128 с. (In Rus.)].

[37] *Типовые требования на автоматизацию центральных тепловых пунктов*. М.: 2023. 33 с. [Typical requirements for the automation of central heating stations. М.: 2023. 33 с. (In Rus.)].

[38] <https://disk.yandex.ru/i/-wiX3-gKC8gsEA>.

[39] Андык В.С. *Автоматизированные системы управления технологическими процессами на ТЭС*. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016 408 с. [Andyk V.S. *Automated control systems of technological processes at TPPs*. Tomsk: Izd-vo Tomsk Polytechnic University, 2016 408 p. (In Rus.)].

[40] Любанович Билл *Простой Python. Современный стиль программирования*. СПб.: Питер, 2021 592 с.: (Серия «Бестселлеры O'Reilly») [Lubanovich Bill *Simple Python. Modern programming style*. SPb.: Piter, 2021 592 p.: (O'Reilly Bestsellers Series) (In Rus.)].

[41] Гафаров Ф.М., Галимянов А.Ф. *Искусственные нейронные сети и приложения*. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018. 121 с. [Gafarov F.M., Galimyanov A.F. *Artificial neural networks and applications*. Kazan: Izd-vo Kazan. uncta, 2018. 121 с. (In Rus.)].

[42] Елисеев А.И., Минин Ю.В., Кулаков Ю.В. *Решение задач глубокого обучения с использованием фреймворков Pytorch и Pytorch Lightning* [Электронный ресурс] Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2023. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования: ПК не ниже класса Pentium II; CD-ROM-дисковод; 3,0 Mb; RAM; Windows 95/98/XP; мышь. Загл. с экрана [Eliseev A.I., Minin Yu.V., Kulakov Yu.V. *Solving deep learning problems using Pytorch and Pytorch Lightning frameworks* [Electronic resource] Tambov: Publishing center of FSBEU VO “TSTU”, 2023. 1 electronic optical disk (CD-ROM). – System requirements: PC not lower than class Pentium II; CD-ROM-disk drive; 3,0 Mb; RAM; Windows 95/98/XP; mouse. Caption from the screen (In Rus.)].

Theoretical and Applied Heat Engineering  
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: IAWZVU

УДК 621.48

**Influence of the Thermodynamic Parameters  
and Architecture of the Two-Stage Rankin Cycle  
on Its Efficiency**

**Pavel A. Shchinnikov,  
Olesya V. Borush and Alina A. Luzina\***  
*Novosibirsk State Technical University  
Novosibirsk, Russian Federation*

Received 11.02.2025, received in revised form 04.04.2025, accepted 09.04.2025

**Abstract.** One of the directions of the development of power plants for electric power generation is the application of two-stage Rankine cycles. Two working fluids are used in them: water vapor and refrigerant. Each working fluid circulates in its circuit and does work. External energy supply from the combustion of organic fuel is realized in the steam-water Rankine cycle. The heat removed from the steam-water circuit is directed to a heat exchanger, where low-boiling working fluid steam is generated. This circuit is commonly referred to as the organic Rankine cycle (ORC). The article considers two-stage Rankine cycles of different levels of complexity using a wide range of cooling agents. It is shown that the increase in the thermal efficiency of such cycles is associated with the amount of cooling agent vapor generated by 1 kg/s of water vapor and depends on the type of working fluid. The analysis of such cycles operation was carried out depending on the initial temperature of the water vapor inlet to the steam turbine, the initial temperature of the cooling agent inlet to the ORC-turbine, and the ambient temperature. It is shown that the initial temperature of water vapor and cooling agents affects the cycle efficiency in different ways. It is demonstrated that as the thermal scheme of the two-stage cycle becomes more complex, its efficiency increases by more than 8 %. It is shown that the two-stage Rankine cycle is comparable with steam power plant for supercritical and ultra -supercritical parameters, and in-cycle fuel gasification technologies and inferior to the Allam cycle and combined cycle gas turbine unit based on promising H and HA series gas turbines.

**Keywords:** two-stage Rankine cycle, ORC, refrigerant, R-agent, thermal scheme, method, calculations, efficiency.

Citation: Shchinnikov P. A., Borush O. V., Luzina A. A. Influence of the Thermodynamic Parameters and Architecture of the Two-Stage Rankin Cycle on Its Efficiency. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(3), 325–342. EDN: IAWZVU



© 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: frantsevaalina@gmail.com

## Влияние термодинамических параметров и архитектуры двухступенчатого цикла Ренкина на его эффективность

П. А. Щинников, О. В. Боруш, А. А. Лузина

*Новосибирский государственный технический университет  
Российская Федерация, Новосибирск*

**Аннотация.** Одним из направлений развития энергетических установок для выработки электроэнергии является применение двухступенчатых циклов Ренкина. В них применяют два рабочих тела: водяные пары и хладон. Каждое рабочее тело циркулирует в собственном контуре и совершает работу. Внешний подвод энергии от сжигания органического топлива осуществляют в пароводяном цикле Ренкина. Теплоту, выводимую из пароводяного контура, направляют в теплообменник, где генерируют пар низкокипящего рабочего тела. Этот контур принято называть органическим циклом Ренкина (ORC).

В статье рассмотрены двухступенчатые циклы Ренкина разного уровня сложности с использованием широкого ряда хладонов. Показано, что рост термической эффективности таких циклов связан с количеством пара хладонов, генерируемым 1 кг/с водяного пара, и зависит от вида рабочего тела. Проведен анализ работы таких циклов в зависимости от температуры входа водяного пара в паровую турбину, температуры входа хладона в ORC-турбину и температуры окружающей среды. Выявлено, что температура входа водяного пара и хладагента по-разному влияет на эффективность цикла. Сделан вывод, что по мере усложнения тепловой схемы двухступенчатого цикла его эффективность растет более чем на 8 %. Показано, что двухступенчатый цикл Ренкина сопоставим с технологиями паросиловой установки на сверхкритических и суперсверхкритических параметрах и внутрицикловой газификации топлива и уступает циклу Аллама и ПГУ на основе перспективных газовых турбин серий Н и НА.

**Ключевые слова:** двухступенчатый цикл Ренкина, ORC, хладон, R-агент, тепловая схема, метод, расчеты, эффективность.

Цитирование: Щинников П. А. Влияние термодинамических параметров и архитектуры двухступенчатого цикла Ренкина на его эффективность / П. А. Щинников, О. В. Боруш, А. А. Лузина // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(3). С. 325–342. EDN: IAWZVU

### Введение

Важным направлением трансформации мировой энергетики является ее совершенствование на основе органического топлива. Одним из вариантов является развитие традиционных пароводяных циклов Ренкина за счет их усовершенствования с переходом на суперпараметры или использования теплоты низкого потенциала разных потоков теплоносителей. Для реализации направления, связанного с использованием отработанного тепла, перспективным является органический цикл Ренкина (ORC), так как этот процесс реализуют при средних и низких температурах. В результате процесса получают электроэнергию. Технически и технологически процесс реализуют подобно пароводяному циклу Ренкина, однако в качестве рабочего тела выступают вещества (хладоны) с низкими температурами кипения при атмосферном давлении [1–5]. Подобные технические решения могут применяться при реализации геотермальных электростанций [6], при утилизации теплового потока, сбрасываемого от двигателя внутреннего сгорания [7, 8], с реализацией тепловой схемы, показанной в [9], и выработкой электроэнергии,

при утилизации других сбросных тепловых потоков разных технологических циклов и производств [10–14]. Особое внимание уделяют выбору рабочего тела, так как необходимо обеспечить не только техническую реализацию и эффективность, но и экологичность и безопасность [15–24]. Классификация хладонов по их воздействию на окружающую среду представлена в табл. 1.

Следует отметить, что применение низкокипящих рабочих тел расширяет возможности пароводяного цикла Ренкина. Такие циклы получили название двухступенчатого цикла Ренкина. Для их реализации требуется вода и низкокипящее вещество (как правило, в виде алканов, фторированных алканов или смесей) в качестве рабочих тел. Внешний подвод теплоты осуществляется при генерации водяного пара высоких параметров. Этот пар затем совершает работу в паровой турбине, а процесс его конденсации осуществляют в теплообменнике с одновременной генерацией пара второго низкокипящего рабочего тела, которое затем совершает работу в собственной турбине. В обоих случаях реализуют цикл Ренкина. Таким образом, обеспечивается его двухступенчатость [2].

Тепловая схема энергетической установки с двухступенчатым циклом Ренкина в общем случае содержит два контура и не имеет водяного конденсатора (рис. 1). Внешний подвод теплоты обеспечивают за счет сжигания топлива при генерации водяного пара. Отработавший в паровой турбине пар направляют в теплообменник, где обеспечивают процесс его конденсации за счет генерации пара низкокипящего рабочего тела (далее по тексту – R-агента) в ORC-контуре установки. Конденсация отработавшего в ORC-турбине низкокипящего рабочего тела обеспечивается в воздушном конденсаторе. Это позволяет использовать подобные установки в безводных или маловодных районах, в том числе в условиях Арктики. Кроме того, паровая турбина работает только в зоне сухого пара, что снимает проблемы влажнопаровых ступеней, а из-за высокой плотности низкокипящего рабочего тела габариты ORC-турбины невысокие. Важно отметить, что установки могут иметь разную конфигурацию и использовать разные R-агенты.

Изучение термодинамических особенностей таких установок для выработки электроэнергии актуально. Работа посвящена изучению двухступенчатых циклов Ренкина при изменении их архитектуры за счет различной организации подвода теплоты в разных контурах установки и влиянию этих способов подвода теплоты на эффективность циклов. Одновременно ведется анализ влияния температуры подвода теплоты к пароводяному и низкокипящему контурам установки, а также температуры отвода теплоты от нее на эффективность двухступенчатого

Таблица 1. Воздействие хладонов на озоновый слой [25–28]

Table 1. Impact of refrigerants on the ozone layer [25–28]

Класс соединений	Время жизни в атмосфере, лет	Воздействие на озоновый слой
Хлорфторуглероды (CFC)	> 50	Вызывают истощение озонового слоя
Бромфторуглероды (BrFC)		
Хлорфторуглеводороды (HCFC)	> 5	Вызывают слабое истощение озонового слоя
Фторуглеводороды (HFC)	< 1	Не вызывают истощения озонового слоя
Фторуглероды (CF)		

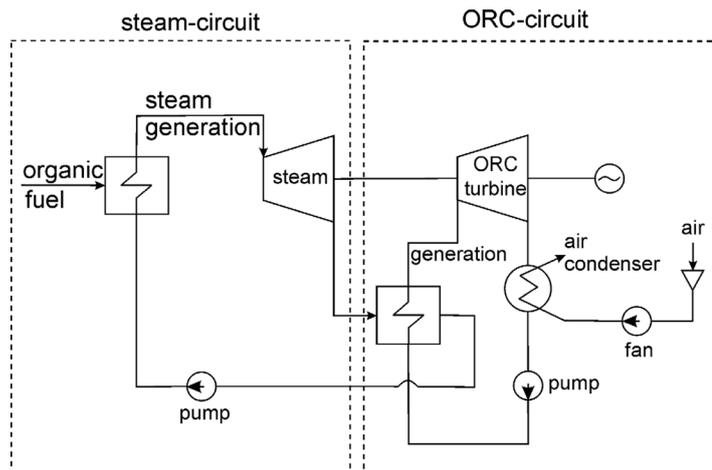


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема установки для реализации двухступенчатого цикла Ренкина

Fig. 1. Principal thermal scheme of the installation for the implementation of a two-stage Rankine cycle

цикла. Рассматривается широкий спектр R-агентов. Такое исследование необходимо для определения наилучшего по термодинамической эффективности варианта.

### 1. Архитектура цикла и процессы в нем. Постановка задачи

Двухступенчатый цикл Ренкина может быть реализован без регенерации, с внутренней регенерацией, внешней регенерацией, многократной регенерацией и с внешним подводом теплоты к обоим контурам рабочего тела (рис. 2–8).

Базовый двухступенчатый цикл показан на рис. 2. Здесь обеспечивают внешний подвод теплоты к пароводяному контуру с высокой температурой в теплообменнике 1. Отработавший

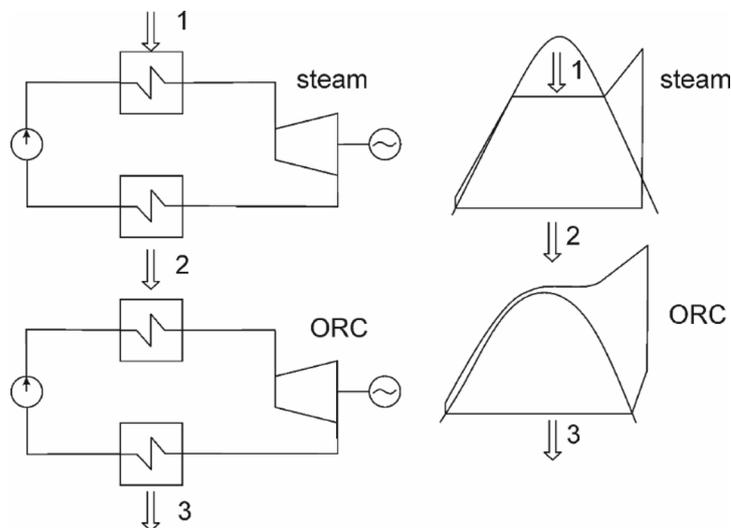


Рис. 2. Архитектура двухступенчатого цикла Ренкина БЦ и процессы в  $t, s$  — диаграмме

Fig. 2. Architecture of the base two-stage Rankine cycle (BC) and processes in  $t, s$  — diagram

в паровой турбине пар направляют в теплообменник 2, где обеспечивается генерация пара низкотемпературного рабочего тела (R-агента) со средней температурой. Пар R-агента совершает работу в ORC-турбине, после чего его направляют в теплообменник 3, где обеспечивают его конденсацию за счет охлаждения воздухом с температурой окружающей среды. Рассмотренный двухступенчатый цикл является базовым (БЦ).

Цикл с внутренней регенерацией (ВРЦ) предусматривает наличие дополнительного теплообменника 4 для утилизации сбросного после ORC-турбины потока теплоты в контуре R-агента (рис. 3). Следует обратить внимание, что в этом случае, как и в первом, процесс расширения в паровой турбине заканчивается в зоне влажного пара (рис. 2, 3).

Цикл с двойной внутренней регенерацией (ВРЦД) по сравнению с предыдущим (ВРЦ) предусматривает установку теплообменника 5 в пароводяном контуре установки (рис. 4). При

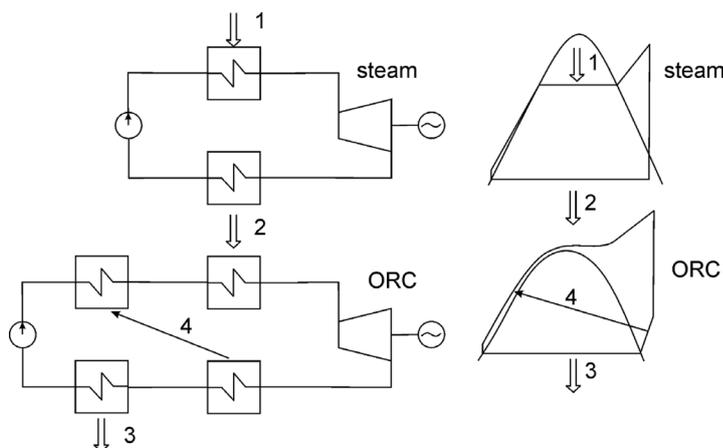


Рис. 3. Архитектура двухступенчатого цикла Ренкина ВРЦ и процессы в  $t, s$  – диаграмме

Fig. 3. Architecture of the two-stage Rankine cycle with internal regeneration (CIR) and processes in  $t, s$  – diagram

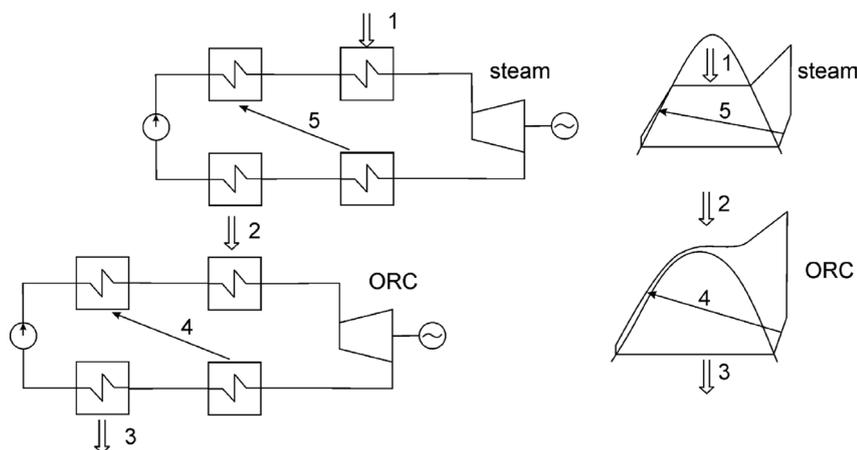


Рис. 4. Архитектура двухступенчатого цикла Ренкина ВРЦД и процессы в  $t, s$  – диаграмме

Fig. 4. Architecture of the two-stage Rankine cycle with double internal regeneration (CIRD) and processes in  $t, s$  – diagram

этом процесс расширения в паровой турбине заканчивается в зоне сухого пара (как показано в  $t, s$  – диаграмме), что, с одной стороны, позволяет реализовать регенерационный тепловой поток в теплообменнике 5, а с другой – обеспечить более высокую температуру нагрева R-агента в ORC-контуре установки, по сравнению с вариантом ВРЦ.

Цикл с внутренней и внешней регенерацией (ВВРЦ) предусматривает наличие дополнительного теплообменника 6 по сравнению с ВРЦ (рис. 5). При этом процесс расширения в паровой турбине заканчивается в зоне сухого пара, аналогично ВРЦД, однако регенерационный тепловой поток направляют в теплообменник 6 для повышения температуры R-агента в ORC-контуре установки.

Цикл с двойной внутренней и внешней регенерацией (ВВРЦД) объединяет в себе ВРЦД и ВВРЦ, включая весь набор оборудования и их термодинамические преимущества (рис. 6).

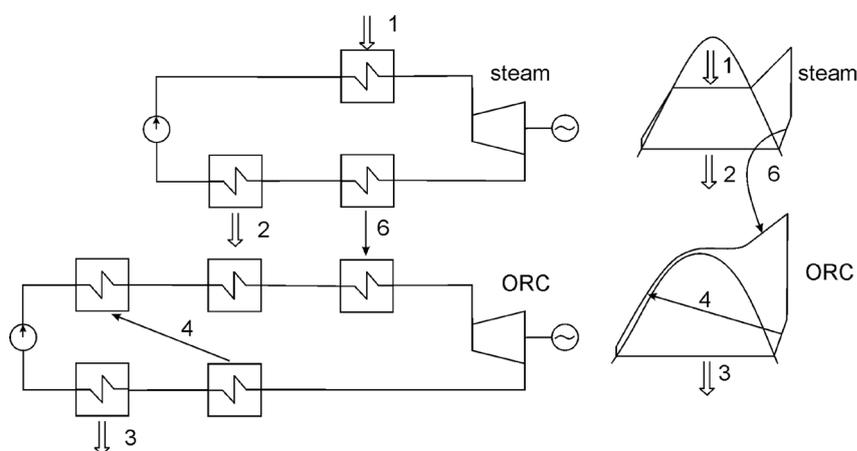


Рис. 5. Архитектура двухступенчатого цикла Ренкина ВВРЦ и процессы в  $t, s$  – диаграмме

Fig. 5. Architecture of the two-stage Rankine cycle with internal and external regeneration (CIER) and processes in  $t, s$  – diagram

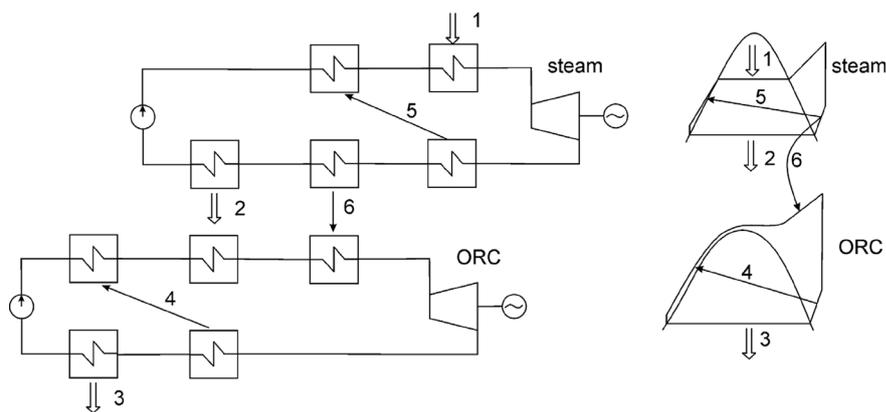


Рис. 6. Архитектура двухступенчатого цикла Ренкина ВВРЦД и процессы в  $t, s$  – диаграмме

Fig. 6. Architecture of the two-stage Rankine cycle with double internal and external regeneration (CIERD) and processes in  $t, s$  – diagram

Цикл с двойной внутренней регенерацией и внешним подводом теплоты (ВРЦДВ) по сравнению с предыдущим имеет теплообменник 7, расположенный между теплообменниками 2 и 4 на линии R-агента в ORC-контуре установки. В этом теплообменнике обеспечивается внешний подвод теплоты в ORC-контур за счет сбросного потока уходящих газов, полученных при сжигании топлива (см.  $t, s$  – диаграмму, рис 7, линия 0). Конструктивно это может быть организовано в паровом котле, предназначенном для генерации пара в пароводяном контуре установки, за счет размещения в нем дополнительных поверхностей нагрева, включенных в ORC-контур.

Цикл с двойной внутренней регенерацией, внешней регенерацией и внешним подводом теплоты (ВВРЦДВ) включает в себя все перечисленные выше устройства и объединяет все термодинамические преимущества (рис. 8).

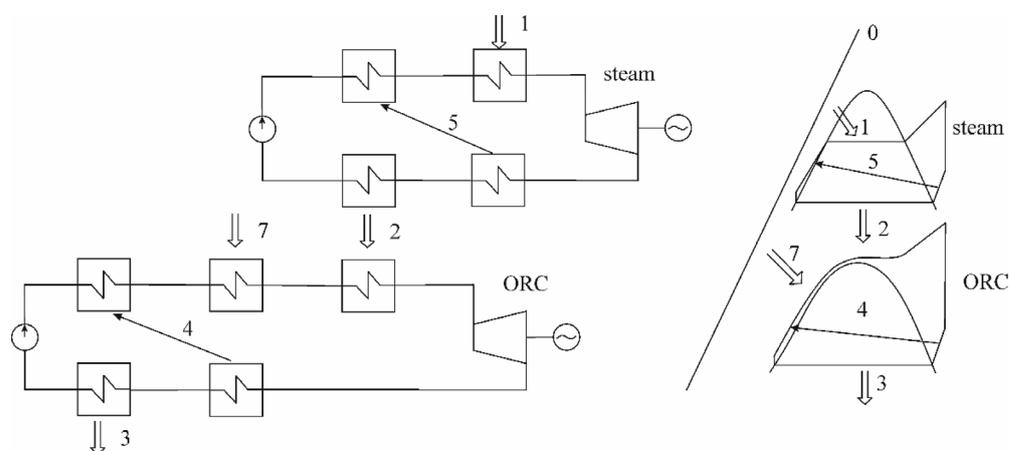


Рис. 7. Архитектура двухступенчатого цикла Ренкина ВРЦДВ и процессы в  $t, s$  – диаграмме

Fig. 7. Architecture of the two-stage Rankine cycle with double internal regeneration and external heat supply (CIRDEH) and processes in  $t, s$  – diagram

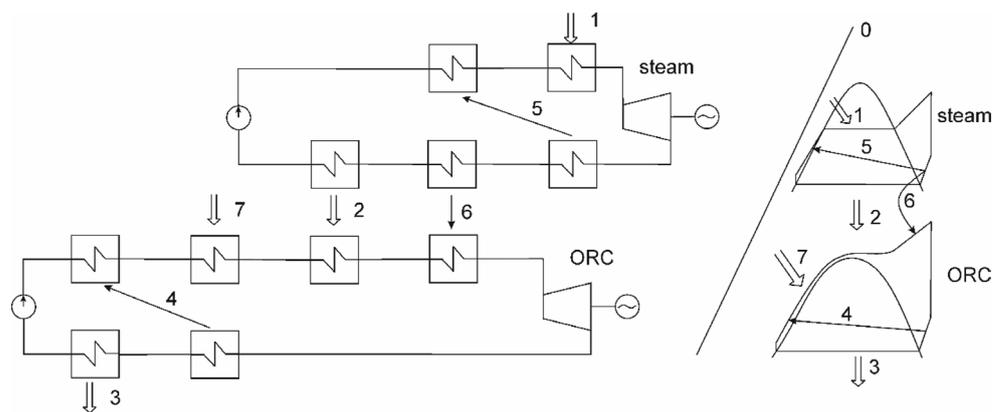


Рис. 8. Архитектура двухступенчатого цикла Ренкина ВВРЦДВ и процессы в  $t, s$  – диаграмме

Fig. 8. Architecture of the two-stage Rankine cycle with double internal and external regeneration and external heat supply (CIERDEH) and processes in  $t, s$  – diagram

Требуется разработать расчетную модель и методику исследования, которые позволят получить данные по термодинамическим и энергетическим эффектам всех представленных циклов. Это необходимо для того, чтобы сравнить циклы между собой и с другими известными техническими решениями. Необходимо установить, как термодинамические параметры и усложнение установки влияют на ее эффективность, каков может быть прирост электрической мощности у двухступенчатого цикла Ренкина по отношению к одноступенчатому, какой прирост эффективности обеспечивают разные рабочие тела.

## 2. Расчетная модель двухступенчатого цикла

### 2.1. Основные положения расчетного метода

В основе расчетной модели лежит метод энергобалансов. Основные положения метода представлены ниже.

Тепловые потоки, подведенные к теплообменникам, описываются системой уравнений:

$$\begin{cases} Q_1 = G_{\text{H}_2\text{O}} (h_0 - h_4) ; \\ Q_2 = G_{\text{H}_2\text{O}} (h_2 - h_3) = G_R (h_5^R - h_6^R) ; \\ Q_3 = G_R (h_2^R - h_3^R) ; \\ Q_4 = G_R C_{pR_1} \Delta t_1 = G_R C_{pR_2} \Delta t_2 ; \\ Q_5 = G_5 (h_1 - h_4) = G_{23} (h_4 - h_3) ; \\ Q_6 = G_R (h_0^R - h_5^R) = G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{ext}} (h_1 - h_{dr}) ; \\ Q_7 = G_R (h_6^R - h_4^R) . \end{cases} \quad (1)$$

В этих выражениях индекс «H<sub>2</sub>O» и «R» характеризуют пароводяной и низкокипящий контуры установки;  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  – температурные напоры греющего и нагреваемого теплоносителя в регенеративном теплообменнике (4, рис. 2–8); термодинамические параметры пароводяного контура определяют по [29], параметры низкокипящего рабочего тела (R-агента) определяют по [30]; 1–6 – характеризуют точку процесса (рис. 9);  $G$  – расходы рабочего тела;  $G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{ext}}$  – расход водяного пара для обеспечения внешней регенерации;  $G_5$  – расход водяного пара для обеспечения внутренней регенерации;  $G_{23}$  – расход основного конденсата в пароводяном контуре;  $G_{pR}$  – изобарная теплоемкость низкокипящего рабочего тела;  $h$  – энтальпии рабочего тела в характерных точках цикла.

Массообмен отсутствует, то есть для всех процессов справедливо выражение:  $G = \text{const}$

Мощность, развиваемая паровой и ORC-турбинами:

$$\begin{cases} N_{\text{H}_2\text{O}} = G_{\text{H}_2\text{O}} (h_0 - h_1) ; \\ N_R = G_R (h_0^R - h_1^R) . \end{cases} \quad (2)$$

Решение систем уравнений (1) и (2) не представляет сложности и позволяет определить энергетическую эффективность установки в виде:

$$\eta_t = \frac{N_{\text{H}_2\text{O}} + N_R}{Q_1}, \quad (3)$$

где  $Q_1$  – теплота, подведенная с топливом.

Теплообмен с окружающей средой не учитывается.

Подобный подход применяется в практике исследований энергетических установок широко [1, 2, 31, 32], так как позволяет получить сведения о термической эффективности циклов на основе разных рабочих тел.

### 2.2. Дополнительные условия моделирования

Задают параметры входа рабочего тела в паровую турбину и параметры окружающей среды. Все расчеты ведут на 1 кг/с водяного пара при его генерации за счет внешнего подвода теплоты. В этом случае расход пара R-агента определяется следующим выражением:

$$G_R = \frac{h_2 - h_3}{h_5^R - h_4^R}. \quad (4)$$

При организации потока  $Q_7$  за счет утилизации сбросного потока от внешнего подвода теплоты, например за счет организации дополнительных поверхностей нагрева ORC-контура в котле, предназначенном для генерации водяного пара за счет сжигания органического топлива, его величина будет определяться выражением:

$$Q_7 = G_g C_{pg} \Delta t_g, \quad (5)$$

где  $G_g$ ;  $C_{pg}$ ;  $\Delta t_g$  – расход продуктов сгорания органического топлива, его изобарная теплоемкость и температурный напор в теплообменнике.

На основании длительного опыта использования энергетических установок с реализацией цикла Ренкина на водяном паре для первого приближения можно с уверенностью полагать, что  $Q_7$  будет равен 60–80 кВт на 1 кг/с генерируемого водяного пара в зависимости от вида топлива и температуры уходящих газов.

Работа в насосах и необратимость термодинамических процессов не учитываются.

Совокупность представленных методических положений позволит получить расчетные значения термической эффективности двухступенчатых циклов Ренкина разной архитектуры, установить влияние термодинамических параметров на эффективность циклов, установить прирост электрической мощности двухступенчатого цикла по отношению к одноступенчатому.

### 2.3. Условия проведения расчетов

К расчетам принят широкий спектр низкокипящих рабочих тел, в том числе устаревшие, промежуточные, долгосрочные (перспективные), однокомпонентные и многокомпонентные в виде смесей.

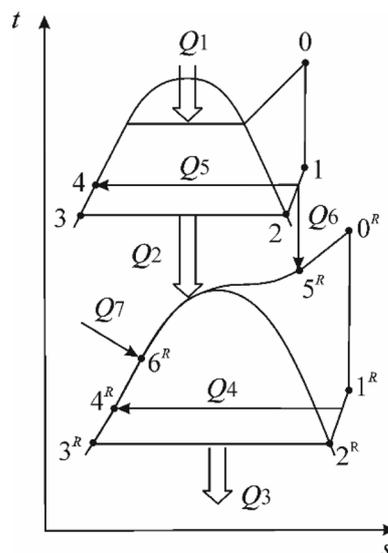


Рис. 9.  $t, s$  – диаграмма двухступенчатого цикла Ренкина:  $Q_1 - Q_7$  – тепловые потоки

Fig. 9.  $t, s$  is a diagram of the two-stage Rankine cycle:  $Q_1 - Q_7$  – heat flows

Температура отвода теплоты соответствует температуре окружающей среды и принята  $t^* = +30$  °С. Это значение характеризует пессимистичность результатов, так как ее снижение приведет к повышению эффективности цикла.

Параметры водяного пара на входе в турбину соответствуют широко освоенным значениям, принятым в реальных энергетических установках:  $P_0 = 13$  МПа;  $t_0 = 550$  °С.

При расчете базового цикла для всех R-агентов пароводяной контур считается неизменным и его термодинамические и энергетические характеристики в точках цикла соответствуют следующим значениям:  $h_0 = 3471$  кДж/кг;  $h_1 = 2765$  кДж/кг;  $h_3 = 742$  кДж/кг;  $H_0^{H_2O} = 706$  кДж/кг;  $Q_1 = 2729$  кВт;  $Q_2 = 1982$  кВт;  $N_{H_2O} = 706$  кВт.

### 3. Результаты и обсуждения

#### 3.1. Влияние термодинамических параметров на эффективность

Выбор принятых к расчетам R-агентов обусловлен двумя факторами. Во-первых, рассматривается широкая гамма рабочих тел, включая фреоны и вещества природного происхождения. Рассматриваются алканы, фтористые, хлористые хладагенты и их смеси. Во-вторых, рассматриваются вещества, которые представлены на современном рынке низкокипящих рабочих тел. Их совокупность отражает практическую возможность работы двухступенчатых циклов на рабочих телах, как среднесрочной, так и долгосрочной перспективы. Для примера рассмотрены устаревшие рабочие тела на основе хлористых хладагентов. Результаты расчетов циклов на их основе интересны только в теоретическом плане.

Результаты расчетов базового цикла (БЦ) для разных R-агентов характеризуют термодинамические, расходные и энергетические показатели его ORC-контура (табл. 2) и эффективность, рис. 10.

Прирост электрической мощности в ORC-контуре будет зависеть от располагаемого теплоперепада на ORC-турбине и расхода низкокипящего рабочего тела. При фиксированных термодинамических параметрах пароводяного контура располагаемый теплоперепад на ORC-турбине будет определяться тепловой схемой установки, свойствами рабочего тела и температурой окружающей среды. При неизменной схеме установки и фиксированной температуре окружающей среды прирост электрической мощности будет зависеть только от свойств рабочего тела. В табл. 2 показаны рабочие характеристики ORC-контура базового двухступенчатого цикла Ренкина для разных рабочих тел. Можно видеть, что располагаемый теплоперепад на ORC-турбину составляет 25–265 кДж/кг. Генерация низкокипящего пара одним килограммом водяного пара может составлять от 1,41 до 10,953 кг, а прирост электрической мощности от 180 до 485 кВт на каждый килограмм водяного пара, задействованного в работе установки. Очевидно, что изменение термодинамических параметров входа в паровой контур не приведет к изменениям характеристик работы низкокипящего контура.

Таким образом, при выборе низкокипящего рабочего тела следует учитывать фактор энергетической эффективности его использования, который зависит от термодинамических характеристик ORC-контура установки.

При фиксированных термодинамических параметрах входа и выхода в ORC-контуре увеличение его мощности можно обеспечить путем усложнения тепловой схемы с одновременным увеличением генерации низкокипящего рабочего тела каждым килограммом водяного пара. Это будет сопровождаться увеличением термического КПД в соответствии с уравнением 3.

Таблица 2. Термодинамические, расходные и энергетические показатели ОРС-контура базового двухступенчатого цикла Ренкина

Table 2. Thermodynamic, consumption and energy indicators of the ORC circuit of a base two-stage Rankine cycle

R-агент		ОРС-контур (базовый цикл)					
Марка	Формула	$h_{0R}$	$h_{1R}$	$h_{3R}$	$H_{0R}$	$G_R$	$N_R$
		кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг	кг/с	кВт
Алканы							
R 170	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (этан)	855	812	337,5	43	3,831	164,73
R 290	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (пропан)	861	760	287,5	101	3,457	349,15
R 600	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> (бутан)	772	665	273	107	3,973	425,11
R 600a	CH(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> (изобутан)	778	677	270	101	3,903	394,17
Фтористые хладагенты							
R 134a	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>	535	486	242	49	7,201	352,84
R 152a	CH <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub>	675	608	250	67	4,665	312,54
R 32	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	676,6	648,8	255,4	27,8	4,807	133,63
Хлористые хладагенты							
R 11	CCL <sub>3</sub> F	462	404	225	58	8,365	485,18
R 113	CCL <sub>2</sub> FCCLF <sub>2</sub>	460	407	226	53	8,472	449,04
R 114	CCLF <sub>2</sub> CCLF <sub>2</sub>	411	377	230	34	10,953	372,41
R 12	CCL <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	412	371	230	41	10,893	446,62
R 123	CHCL <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	465	410	230	55	7,801	434,00
R 21	CHCL <sub>2</sub> F	532	466	231	66	6,587	434,71
R 22	CHCLF <sub>2</sub>	485	431	236	54	7,66	413,64
Смеси							
R 401A	R 22/152a/124 (53/13/34 %)	510	460	231	50	7,106	355,29
R 401B	R 22/152a/124 (61/11/28 %)	530	487	230	43	6,608	284,16
R 401C	R 22/152a/124 (33/15/52 %)	529	490	230	39	6,631	258,59
R 402A	R 125/290/22 (60/2/38 %)	489	450	240	39	7,962	310,52
R 402B	R 125/290/22 (38/2/60 %)	505	473	240	32	7,481	239,40
R 404A	R 125/143a/134a (44/52/4 %)	520	489	245	31	6,301	195,33
R 407A	R 32/125/134a (20/40/40 %)	550	519	239	31	6,375	197,62
R 407B	R 32/125/134a (10/70/20 %)	515	490	240	25	7,209	180,23
R 408A	R 22/143a/125 (47/46/7 %)	525	470	238	55	6,908	379,93
R 409A	R 22/124/142b (60/25/15 %)	551	507	235	44	7,07	311,08
R 410A	R 32/125 (50/50 %)	568	531	251	37	6,254	231,40
R 410B	R 32/125 (45/55 %)	556	532	248	34	6,234	211,97
R 502	R 22/115 (48,8/51,2 %)	454	418	235	36	9,053	325,90
R 507A	R 125/R 134a (50/50 %)	520,4	493	239	27,4	7,2	197,2
Другие							
R 717	NH <sub>3</sub> (аммиак)	1750	1485	345	265	1,411	373,93
RC 318	C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> (перфторциклобутан)	576	538	259	38	6,254	237,65
R 1270	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (пропилен)	850	727	275	123	3,448	424,09

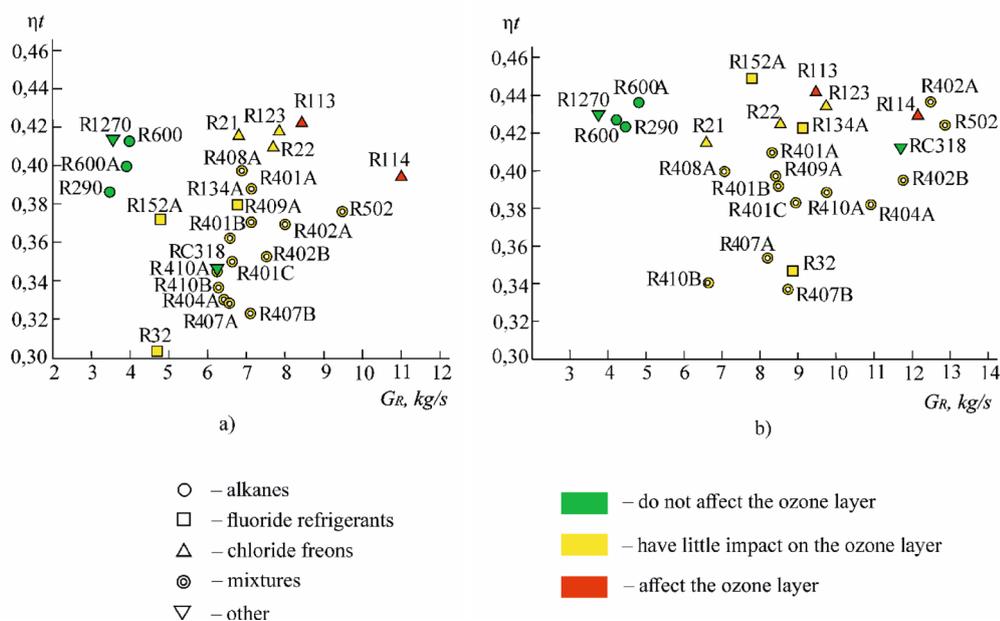


Рис. 10. Эффективность двухступенчатого цикла Ренкина: а) БЦ; б) ВРЦ

Fig. 10. Efficiency of the two-stage Rankine cycle: a) base cycle; б) with double internal regeneration

Можно видеть, что термический КПД базового цикла лежит в пределах 0,31–0,421 в зависимости от R-агента (рис. 10а). Вместе с тем обеспечение внутренней регенерации поднимает термический КПД до 0,339–0,448 (рис. 10б). Рост термодинамической эффективности связан с увеличением количества генерируемого пара R-агента (рис. 11). Это увеличение связано с работой теплообменника-регенератора (4, рис. 3), в котором обеспечивают утилизацию теплового потока R-агента, покидающего ОРС-турбину. Легко видеть, что прирост  $\eta_t$  связан со свойствами R-агента и колеблется в широком диапазоне 1,01–1,2 для рассмотренных низкокипящих рабочих тел (рис. 11).

Влияние основных параметров на эффективность базового цикла (БЦ) характеризуется температурами подвода и отвода теплоты от каждого контура и выражается температурой пара на входе в паровую турбину ( $t_0$ ), температурой пара R-агента ( $t_0^R$ ) и температурой окружающей среды  $t_* = t_{2R}$  (рис. 12). Здесь  $\delta\eta_t$  характеризует прирост эффективности от изменения ( $t_i/t_0$ ) термодинамического параметра, выраженный в долях по отношению к приросту эффективности от действия только регенератора. Например, увеличение температуры входа в паровую турбину  $t_0$  в 1,02 раза (на  $\sim 10^\circ\text{C}$ ) обеспечит увеличение прироста эффективности цикла в 1,02 раза. Таким образом, если абсолютный прирост эффективности при переходе к ВРЦ составит на уровне 1,7 % для изобутана (R 600а, см. рис. 10, 11), то при одновременном увеличении температуры на входе в паровую турбину на  $30^\circ\text{C}$  этот прирост будет составлять около 1,8 %.

Аналогичным образом ведут анализ других показателей. Увеличение температуры входа в ОРС-турбину связано с одновременным снижением температуры выхода из паровой турбины. Это обусловлено тепловой схемой установки. Из этого следует, что прирост располагаемого теплоперепада в ОРС-турбине будет сопровождаться снижением его в паровой турбине. Таким

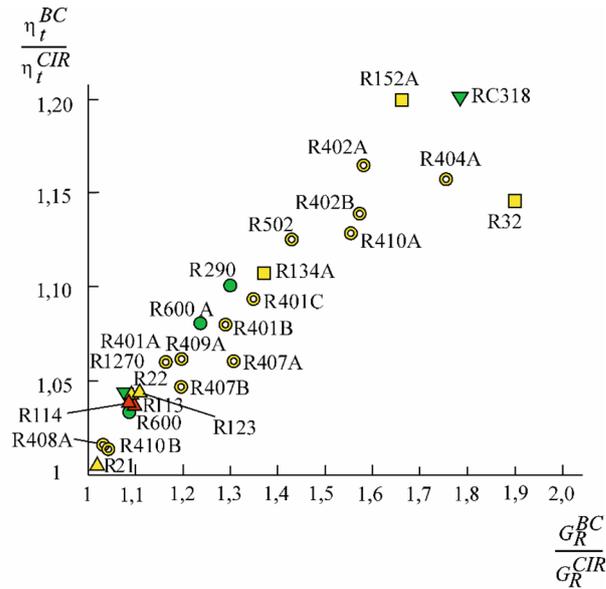


Рис. 11. Прирост эффективности цикла ВЦН по отношению к базовому циклу БЦ ( $\frac{\eta_t^{BC}}{\eta_t^{CIR}}$ ) в зависимости от прироста R-агента ( $\frac{G_R^{BC}}{G_R^{CIR}}$ ), генерируемого 1 кг/с водяного пара за счет эффекта в регенераторе: обозначение те же, что и на рис. 10

Fig. 11. Increase in efficiency of the cycle with internal regeneration (CIR) in relation to the basic cycle (BC),  $\frac{\eta_t^{BC}}{\eta_t^{CIR}}$  depending on the increment of R-agent  $\frac{G_R^{BC}}{G_R^{CIR}}$  generated by 1 kg/s of water vapor due to the effect in the regenerator: the designation is the same as in Fig.10

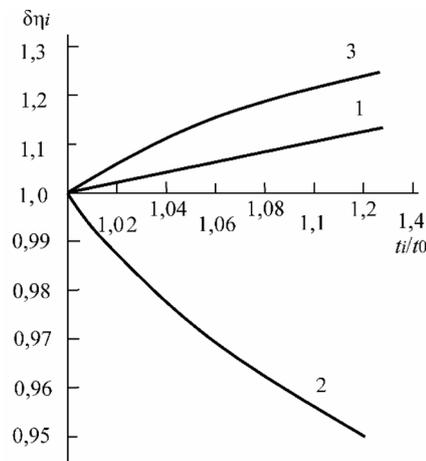


Рис. 12. Влияние термодинамических параметров на прирост эффективности ( $\delta\eta_i$ ) двухступенчатого цикла Ренкина: 1 – температура пара на входе в паровую турбину; 2 – температура пара на входе в ORC-турбину; 3 – температура окружающей среды

Fig. 12. Influence of thermodynamic parameters on the efficiency gains ( $\delta\eta_i$ ) of the two-stage Rankine cycle: 1 – steam temperature at the steam turbine inlet; 2 – steam temperature at the ORC-turbine inlet; 3 – ambient temperature

образом, фактор изменения температуры входа в ORC-турбину ( $t_0^R$ ) сопровождается разнонаправленными эффектами. Можно видеть, что увеличение температуры входа в ORC-турбину сопровождается снижением прироста эффективности. Это связано с тем, что снижение теплоперепада в паровой турбине дает снижение эффекта больше, чем его прирост в ORC-турбине. В частности, увеличение температуры входа в ORC-турбину в 1,04 раза (на 6 °С) для изобутана (R 600a, см. рис. 10, 11) сопровождается суммарным снижением прироста эффективности с 1,7 до 1,64 %.

Снижение температуры отвода теплоты при снижении температуры окружающей среды ведет к росту термического КПД. Анализ рис. 10–12 показывает, что снижение температуры окружающей среды в 1,1 раза (с +30 до ~ 0 °С) приведет к повышению эффективности цикла на 0,5–1 % в зависимости от свойств низкокипящего рабочего тела. Это может быть важным для зимнего времени года, условий Крайнего Севера и Арктики.

### 3.2. Влияние архитектуры цикла на эффективность

Анализ эффективности двухступенчатого цикла любой архитектуры проведен на примере R-134a. Определены термодинамические, расходные и энергетические характеристики в расчетных точках тепловой схемы (табл. 3).

Таблица 3. Термодинамические, расходные и энергетические показатели двухступенчатого цикла Ренкина любой архитектуры для R-134a

Table 3. Thermodynamic, consumption and energy indicators of a two-stage Rankine cycle of any architecture for R-134a)

Параметр	Размерность	Величина						
		БЦ	ВРЦ	ВВРЦ	ВРЦД	ВВРЦД	ВРЦДВ	ВВРЦДВ
H <sub>2</sub> O контур								
$h_0$	кДж/кг	3471						
$h_1$	кДж/кг	2765	2771	2792	2796	2792	2800	
$H_0^{H_2O}$	кДж/кг	706	700	679	675	679	671	
$t_4$	°С	-		253				
$Q_1$	кВт	2729	2734	2411				
$Q_5$	кВт	-		302				
$G_{H_2O}$	кг/с	1						
$N_{H_2O}$	кВт	706	700	679	675	679	671	
ORC контур								
$h_{0R}$	кДж/кг	535		560	535	560	535	560
$h_{1R}$	кДж/кг	486	484	508	484	508	484	508
$h_{2R}$	кДж/кг	242	318	345	318	345	318	345
$H_{0R}$	кДж/кг	49	51	52	51	52	51	52
$t_{2R}$	°С	30	30	30	30	30	30	30
$t_{4R}$	°С	-	77	92	77	93	77	92
$t_{5R}$	°С	-		190	-	190	-	190

Продолжение табл. 3

Table 3 Continued

Параметр	Размерность	Величина						
		БЦ	ВРЦ	ВВРЦ	ВРЦД	ВВРЦД	ВРЦДВ	ВВРЦДВ
$Q_2$	кВт	1982	1981	1795	1651	1493	1749	1470
$Q_3$	кВт	1692	1557	1543	1344	1328	1321	1298
$Q_6$	кВт	-		236	-	196	-	212
$Q_7$	кВт	-					64	
$G_R$	кг/с	6,76	9,13	9,45	7,61	7,86	8,6	8,5
$N_R$	кВт	331	466	491	388	408	411	442

Можно видеть, что при фиксированном значении термодинамических параметров входа в пароводяном контуре наличие в нем внутренней регенерации (варианты ВРЦД, ВВРЦД, ВРЦДВ и ВВРЦДВ) ведет к снижению теплового потока  $Q_1$ , подводимого к установке за счет экономии топлива. Экономия топлива обусловлена увеличением температуры подвода теплоты к циклу за счет появления температуры  $t_4$ . Этот процесс сопровождается некоторым снижением располагаемого теплоперепада на паровую турбину, а следовательно, мощности парового контура установки. Одновременно происходит увеличение температуры R-агента, что сопровождается увеличением энтальпии входа в ORC-турбину для вариантов ВВРЦ, ВВРЦД и ВВРЦДВ (табл. 3). В остальных вариантах температура входа R-агента практически не изменяется. При сохранении располагаемого теплоперепада в ORC-турбине изменяются тепловые потоки  $Q_2$  и  $Q_3$ , что сопровождается увеличением количества генерируемого пара R-агента. Это обуславливает увеличение мощности ORC-контура установки. Совокупность всех факторов ведет к увеличению термического КПД установки (рис. 13).

Следует отметить, что рост мощности установки связан не только с увеличением сложности схемы, но и с совокупностью влияющих термодинамических параметров в обоих ее контурах.

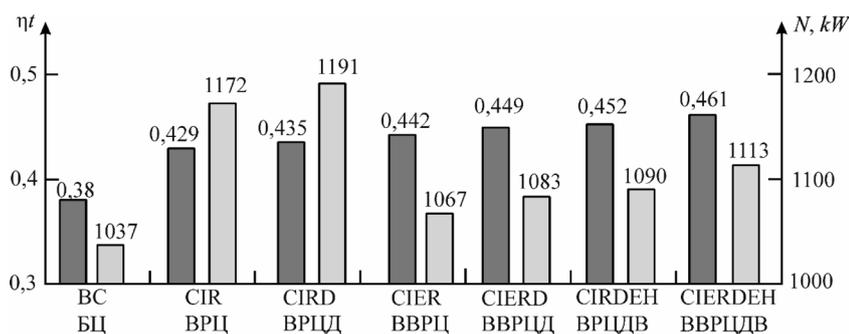


Рис. 13. Эффективность двухступенчатого цикла Ренкина и его мощность на 1 кг/с водяного пара в зависимости от его архитектуры при использовании в ORC-контуре R-134a

Fig. 13. The efficiency of the two-stage Rankine cycle and its capacity per 1 kg/s of water vapor depending on its architecture when used in the R-134a ORC circuit

1. На основе широко опубликованных данных проведено сравнение эффективности двухступенчатого цикла Ренкина с другими технологиями, основанными на сжигании органического топлива (рис. 14). Прирост эффективности двухступенчатого цикла Ренкина по сравнению с паросиловой установкой (ПСУ) на органическом топливе на высокие параметры пара может составлять 3–9 %. В данном случае под высокими параметрами понимаются давление  $P_0 = 9\text{--}13$  МПа и температура  $t_0 = 500\text{--}550$  °С. Рост термической эффективности связан с увеличением количества генерируемого пара R-агента на 1 кг/с водяного пара, зависит от вида рабочего тела и может составлять 1,02–1,2. При этом поиск подходящего по термодинамическим свойствам рабочего тела является важной задачей.

2. Усложнение тепловой схемы двухступенчатого цикла Ренкина направлено на увеличение генерации пара в ORC-контуре установки, что обуславливает рост термической эффективности цикла. Эффективность двухступенчатого цикла растет по мере усложнения схемы с 0,38 до 0,461 при использовании в ORC-контуре R 134a, начальной температуре водяного пара 550 °С и температуре окружающей среды +30 °С.

3. Увеличение начальной температуры R-агента ведет к увеличению располагаемого теплоперепада в ORC-турбине, но сопровождается снижением эффективности цикла за счет одновременного снижения располагаемого теплоперепада в паровой турбине при фиксированных остальных термодинамических параметрах рабочих тел.

4. Двухступенчатый цикл Ренкина обеспечивает прирост эффективности на 3–9 % по сравнению с традиционным циклом Ренкина, реализованным в паросиловой установке. По этому показателю двухступенчатый цикл Ренкина сопоставим с технологиями СКП, ССКП и внутрициклового газификации топлива и уступает циклу Аллама и ПГУ на основе перспективных газовых турбин серий Н и НА.

#### Список литературы / References

- [1] Saleh B., Koglbauer G., Wendland M., Fischer J. Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles, *Energy*, 2007, 32(7), 1210–1221, doi: 10.1016/j.energy.2006.07.001.
- [2] Liu B., Rivière P., Coquelet C., Gicquel R., David F. Investigation of a two stage Rankine cycle for electric power plants, *Applied Energy*, 2012, 100, 285–294, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.05.044.
- [3] Peris B., Navarro-Esbrí J., Molés F. Bottoming organic Rankine cycle configurations to increase Internal Combustion Engines power output from cooling water waste heat recovery, *Applied Thermal Engineering*, 2013, 61(2), 364–371, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.08.016.
- [4] Gaia M. The Altheim rankine cycle turbogenerator 1 MWel organic rankine cycle power plant powered by low temperature geothermal water, *Geothermische Energie*, 2002, 10.
- [5] Desai N. B., Bandyopadhyay S. Process integration of organic Rankine cycle, *Energy*, 2009, 34 (10), 1674–1686, doi: 10.1016/j.energy.2009.04.037.
- [6] Desideri U., Bidini G. Study of possible optimisation criteria for geothermal power plants, *Energy Conversion and Management*, 1997, 38(15–17), 1681–1691, doi: 10.1016/S 0196–8904(96)00209–9.
- [7] Wenzhi G., Junmeng Z., Guanghua L., Qiang B., Liming F. Performance evaluation and experiment system for waste heat recovery of diesel engine, *Energy*, 2013, 55, 226–235, doi: 10.1016/j.energy.2013.03.073.

- [8] Shchinnikov P. A., Marasanov N. V. The methodological features of studying energy efficiency of a combined mini-TPP on the basis of a gas-piston unit and a steam turbine, *Thermophysics and Aeromechanics*, 2017, 24(4), 633–636, doi: 10.1134/S 0869864317040163.
- [9] Cipollone R., Di Battista D., Bettoja F. Performances of an ORC power unit for waste heat recovery on heavy duty engine, *Energy Procedia*, 2017, 129, 770–777.
- [10] Chacartegui R., Sánchez D., Muñoz J.M., Sánchez T., Alternative ORC bottoming cycles for combined cycle power plants, *Applied Energy*, 2009, 86(10), 2162–2170, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.02.016.
- [11] Dai Y., Wang J., Gao L. Parametric optimization and comparative study of organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery, *Energy conversion and management*, 2009, 50(3), 576–582, doi: 10.1016/j.enconman.2008.10.018.
- [12] Sciubba E., Tocci L. Toro C. Thermodynamic analysis of a Rankine dual loop waste thermal energy recovery system, *Energy conversion and management*, 2016, 122, 109–118, doi: 10.1016/j.enconman.2016.05.066.
- [13] Pantaleo A.M. Ciliberti P., Camporeale S., Shah N. Thermo-economic assessment of small scale biomass CHP: steam turbines vs ORC in different energy demand segments, *Energy Procedia*, 2015, 75, 1609–1617, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.381.
- [14] Drescher U., Brüggemann D. Fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass power and heat plants, *Applied thermal engineering*, 2007, 27(1), 223–228, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2006.04.024.
- [15] Tchanche B.F., Lambrinos G., Frangoudakis A., Papadakis G. Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles—A review of various applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(8), 3963–3979, doi: 10.1016/j.rser.2011.07.024.
- [16] Liu B. T., Chien K. H., Wang C. C. Effect of working fluids on organic Rankine cycle for waste heat recovery, *Energy*, 2004, 29(8), 1207–1217, doi: 10.1016/j.energy.2004.01.004.
- [17] Wang J.L., Zhao L., Wang X.D. A comparative study of pure and zeotropic mixtures in low-temperature solar Rankine cycle, *Applied Energy*, 2010, 87(11), 3366–3373, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.05.016.
- [18] Liu H., Shao Y., Li J. A biomass-fired micro-scale CHP system with organic Rankine cycle (ORC) – Thermodynamic modelling studies, *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35(9), 3985–3994, doi: /10.1016/j.biombioe.2011.06.025.
- [19] Chen H., Goswami D. Y., Stefanakos E. K. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat, *Renewable and sustainable energy reviews*, 2010, 14(9), 3059–3067, doi: 10.1016/j.rser.2010.07.006.
- [20] Maizza V., Maizza A. Unconventional working fluids in organic Rankine-cycles for waste energy recovery systems, *Applied thermal engineering*, 2001, 21 (3), 381–390, doi: 10.1016/S 1359–4311(00)00044–2.
- [21] Roy J.P., Mishra M.K., Misra A. Performance analysis of an Organic Rankine Cycle with superheating under different heat source temperature conditions, *Applied Energy*, 2011, 88 (9), 2995–3004, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.02.042.
- [22] Rayegan R., Tao Y. X. A procedure to select working fluids for Solar Organic Rankine Cycles (ORCs), *Renewable Energy*, 2011, 36 (2), 659–670, doi: 10.1016/j.renene.2010.07.010.

- [23] Li T., Liu J., Wang J., Meng N., Zhu J. Combination of two-stage series evaporation with non-isothermal phase change of organic Rankine cycle to enhance flue gas heat recovery from gas turbine, *Energy Conversion and Management*, 2019, 185, 330–338, doi: 10.1016/j.enconman.2019.02.006.
- [24] Liu B., David F., Riviere P., Coquelet C., Gicquel R. Air Cooled Two-Stage Rankine Cycles for Large Power Plants Operating With Different Working Fluids: Performance, Size and Cost, *ASME Power Conference. – American Society of Mechanical Engineers*. Boston, 2013, 56062, V002T08A001, doi: 10.1115/POWER 2013–98075.
- [25] Koh J. H., Zakaria Z. Hydrocarbons as Refrigerants – A Review, *ASEAN Journal on Science and Technology for Development*, 34(1), 35, doi:10.29037/ajstd.73.
- [26] Md. Abdus Salam, Ahamed J.U, Razzq M. A., Bodius Salam. Study and performance analysis of ECO-friendly refrigerant for retrofitting R 22 in respect to Bangladesh, *Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering and Renewable Energy 2015 (ICMERE 2015)*. Chittagong, 2015, doi:10.13140/RG.2.1.2960.8408.
- [27] ODP – Ozone depletion potential of refrigerant (ODP) [Electronic resource] – Access: <https://cold.world/know-how/odp-ozone-depletion-potential-refrigerant>
- [28] Samira Benhadid-Dib, Ahmed Benzaoui. Refrigerants and their environmental impact Substitution of hydro chlorofluorocarbon HCFC and HFC hydro fluorocarbon. Search for an adequate refrigerant, *Energy Procedia*, 2012, 18, 807–816, doi: 10.1016/j.egypro.2012.05.096.
- [29] Александров А. А., Григорьев Б. А. *Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара*, М.: Издательский дом МЭИ, 2003. 168 с. [Aleksandrov A. A., Grigorev B. A. Tables of thermophysical properties of water and water vapor, Moscow, MEI Publishing House, 2003, 168 p. (in Russian)].
- [30] *Термодинамические диаграммы  $i$ -lgP для хладагентов*, М.: АВИСАНКО, 2003. 50 с. [Thermodynamic diagrams  $i$ -lgP for refrigerants, Moscow, AVISANCO, 2003, 50 p. (in Russian)].
- [31] Sadkin I., Shchinnikov P. Thermodynamic features of the regenerative system of direct fired sCO<sub>2</sub> power cycles with oxygen combustion of methane, *Applied Thermal Engineering*, 2023, 234(5), 121301, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121301>.
- [32] Alekseenko S. V., Shchinnikov P. A., Sadkin I. S. Effect of thermodynamic parameters on energy characteristics of CO<sub>2</sub> power cycles during oxygen combustion of methane, *Thermophysics and Aeromechanics*, 2023, 30(1), 83–92, doi: <https://doi.org/10.1134/S 0869864323010109>.
- [33] Киндра В. О., Комаров И. И., Осипов С. К., Злывко О. В., Наумов В. Ю. Термодинамический анализ полужакрытых циклов с кислородным сжиганием топлива и углекислотно-паровым теплоносителем. *Известия российской академии наук. Энергетик*, 2023, 3, 18–33 [Kindra V. O., Komarov I. I., Osipov S. K., Zlyvko O. V., Naumov V.YU. Thermodynamic analysis of semi-closed cycles with oxy-fuel combustion and carbon dioxide-steam working fluid, *Proceedings of the russian academy of sciences. Energy*, 2023, 3, 18–33 (in Russian)].

Theoretical and Applied Heat Engineering  
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: CZADGX

УДК 621.175

**Design and Experimental Analysis  
of a 4kW Rankine Organic Cycle Installation  
on an R142b**

**Denis I. Karabarin\***

*Siberian Federal University  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 26.02.2025, received in revised form 05.04.2025, accepted 09.04.2025

**Abstract.** *AIM.* To determine the effect of changes in external parameters on the operating parameters of the Rankine organic cycle technology (ORC). *METHODS.* The thermodynamic Rankine cycle on organic heat carriers is considered. The analysis of the technology using various working bodies is carried out, taking into account the models of complete and incomplete absorption of primary heat in the evaporator. *RESULTS.* A thermodynamic analysis of the operating parameters of the ORC on various working fluids with varying parameters of the heating and cooling media is presented. The OPR parameter (optimal recovery parameter) is proposed, which takes into account the proportion of recovery of primary heat by the working fluid, depending on the internal parameters of the ORC. Analytical dependences of saturation temperatures and efficiency on changes in external temperatures of heating and cooling media are obtained. *Conclusion.* The choice of a working fluid for ORC installations is a key factor, as it determines the efficiency of the installation, the proportion of primary heat recovery and the specific power generated. The effectiveness of the ORC depends on the saturation and condensation temperatures, which, in turn, are determined by the temperatures of the heating and cooling media. The dependence of the optimal saturation temperature on the temperature of the heating medium is parabolic, and the dependence of the cycle efficiency on the saturation and condensation temperatures is linear, while the angle of inclination decreases with increasing saturation temperature.

**Keywords:** energy-saving technologies, low-potential thermal energy, organic Rankine cycle, freon R142b, plant efficiency.

Citation: Karabarin D. I. Design and Experimental Analysis of a 4kW Rankine Organic Cycle Installation on an R142b. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(3), 343–351. EDN: CZADGX



© 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: DKarabarin@sfu-kras.ru

## Проектирование и экспериментальный анализ установки органического цикла Ренкина на 4кВт на рабочем теле R142b

**Д. И. Карабарин**

*Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск*

**Аннотация.** ЦЕЛЬ – определить влияние изменения внешних параметров на режимные параметры работы технологии органического цикла Ренкина (ОЦР). МЕТОДЫ. Рассмотрен термодинамический цикл Ренкина на органических теплоносителях. Проведен анализ работы технологии с использованием различных рабочих тел, учитывающий модели полного и неполного поглощения первичной теплоты в испарителе. ЕЗУЛЬТАТЫ. Представлен термодинамический анализ режимных параметров работы ОЦР на различных рабочих жидкостях при изменяющихся параметрах греющей и охлаждающей сред. Предложен параметр ОПР (оптимальный параметр восстановления), учитывающий долю восстановления первичной теплоты рабочим телом в зависимости от внутренних параметров ОЦР. Получены аналитические зависимости температур насыщения и КПД от изменения внешних температур: греющей и охлаждающей сред. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Выбор рабочего тела для установок ОЦР является ключевым фактором, так как он определяет эффективность работы установки, долю восстановления первичной теплоты и удельную вырабатываемую мощность. Эффективность ОЦР зависит от температур насыщения и конденсации, которые, в свою очередь, определяются температурами греющей и охлаждающей сред. Зависимость оптимальной температуры насыщения от температуры греющей среды имеет параболический характер, а зависимость КПД цикла от температуры насыщения и конденсации – линейный, при этом угол наклона уменьшается с ростом температуры насыщения.

**Ключевые слова:** энергосберегающие технологии, низкопотенциальная тепловая энергия, органический цикл Ренкина, фреон R142b, эффективность установки.

Цитирование: Карабарин Д. И. Проектирование и экспериментальный анализ установки органического цикла Ренкина на 4кВт на рабочем теле R142b / Д. И. Карабарин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(3). С. 343–351. EDN: CZADGX

### Введение

В последние годы в мире наблюдается рост интереса к энергосберегающим технологиям, особенно к установкам органического цикла Ренкина (ОЦР), которые позволяют утилизировать низкопотенциальную тепловую энергию. Такие установки широко применяются в технически развитых странах, таких как Китай, США, Япония, Италия и Германия. В России также наблюдается рост интереса к подобным технологиям, что подтверждается строительством станций компаниями «Лукойл», «Ultralam» и ПАО «Газпром».

Основная задача данной работы – анализ влияния режимных параметров на эффективность работы установки ОЦР мощностью 4 кВт, работающей на фреоне R142b. Установка предназначена для утилизации тепловой энергии, что делает её актуальной для применения в различных отраслях промышленности [1, 2].

### Методика проектирования и анализа установки ОЦР

На проектирование установок ОЦР наибольшее влияние оказывают параметры источника теплоты и охлаждающей среды. От данных параметров зависит вид рабочего тела для таких установок, обычно выбирают такое тело, у которого давление насыщения до 1 МПа, а давление конденсации атмосферное, так как в качестве расширителя часто используют компрессор, механические узлы которого не способны работать при разряжении [3–5].

Схема установки, соответствующая требованиям безопасности и надежности, представлена на рис. 1. Ресивер в такой установке используется в качестве резервуара для заполнения и запаса рабочего тела. Для повышения надежности установки в нее добавлен сепаратор, удаляющий жидкую фазу из паров хладона перед расширителем. Пуск установки начинается с цикла ресивер-насос-испаритель-сепаратор, после того как температура фреона поднимается до номинальной, начинается его подача на расширитель и конденсатор. Для отвода теплоты охлаждающей воды из конденсатора используется вентиляционная градирня. Контроль параметров и управление работой установки осуществляется согласно схеме КИПиА (рис. 2).

Проектирование установок ОЦР зависит от температур греющей и охлаждающей воды, исходные данные для проектирования установки ОЦР на 4 кВт представлены в табл. 1.

Расчет и подбор рабочего тела был осуществлён с помощью программного продукта [6], оптимальным рабочим телом для такой установки является фреон R142b, температура насыщения составляет 92 °С, расширитель выбран спиральным.

Эффективность цикла ОЦР определяется как

$$\eta_{\text{оцр}} = \frac{h_3 - h_4 - \frac{\Delta h_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}}}{h_3 - h_2},$$

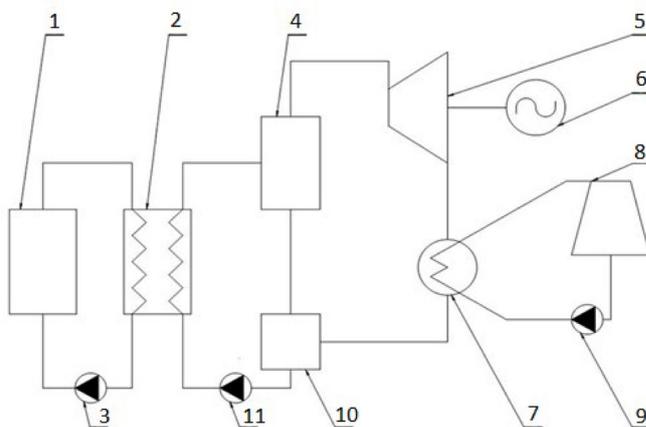


Рис. 1. Технологическая схема установки ОЦР 4 кВт: 1 – источник тепловой энергии; 2 – испаритель; 3 – подающий насос; 4 – сепаратор; 5 – турбина; 6 – электрогенератор; 7 – конденсатор; 8 – градирня; 9 – циркуляционный насос; 10 – ресивер; 11 – питательный насос

Fig. 1. Technological scheme of the 4 kW ORC installation: 1 – heat energy source; 2 – evaporator; 3 – supply pump; 4 – separator; 5 – turbine; 6 – electric generator; 7 – condenser; 8 – cooling tower; 9 – circulation pump; 10 – receiver; 11 – feed pump

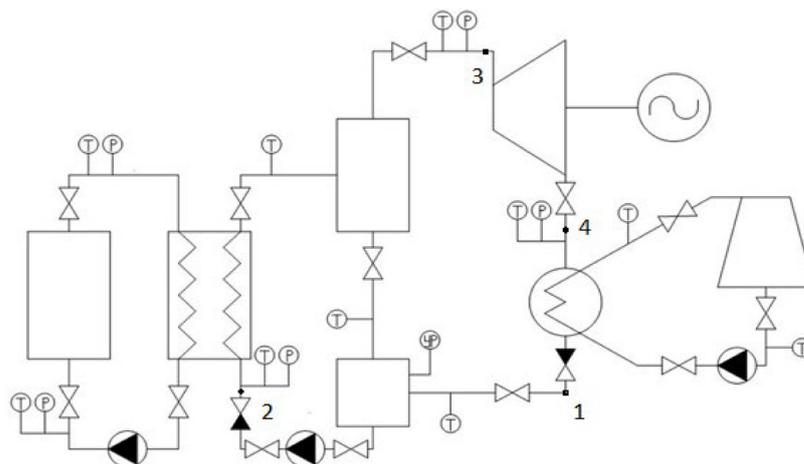


Рис. 2. Схема КИПиА установки ОЦР 4 кВт. Точки 1–4 соответствуют точкам на Р-Н-диаграмме фреона R142b

Fig. 2. Diagram of the instrumentation and control system of a 4 kW ORC installation. Points 1–4 in the figure correspond to the points on the p-h diagram of freon R142b

Таблица 1. Параметры греющей и охлаждающей воды

Table 1. Parameters of heating and cooling water

Тепловая мощность котла, кВт	Температура воды на входе, °С	Температура воды на выходе, °С	Температура охлаждающей воды на входе, °С
40	95	70	26

где  $h_3$  – энтальпия насыщенных паров фреона после испарителя, кДж/кг;  $h_4$  – действительная энтальпия рабочего тела после расширителя, кДж/кг;  $h_2$  – энтальпия фреона на входе в испаритель, кДж/кг;  $\Delta h_n$  – прирост энтальпии при сжатии в насосе;  $\eta_n$  – эффективность насоса.

Мощность установки ОЦР находится как (МВт)

$$N_{\text{оцр}} = Q_{\text{исп}} \cdot \eta_{\text{оцр}},$$

где  $Q_{\text{исп}}$  – тепловая мощность греющей среды, отдаваемая в испарителе, кВт.

Термодинамические параметры рабочего тела в номинальном режиме в характерных точках процесса приведены в табл. 2, цикл работы установки в Р-Н-диаграмме представлены на рис. 3.

После определения основных параметров производится подбор оборудования, входящего в установку. Технические параметры данной установки представлены в табл. 3. 3Д-модель установки, выполненная после подбора оборудования, изображена на рис. 4. Опытно-промышленная установка представлена на рис. 5.

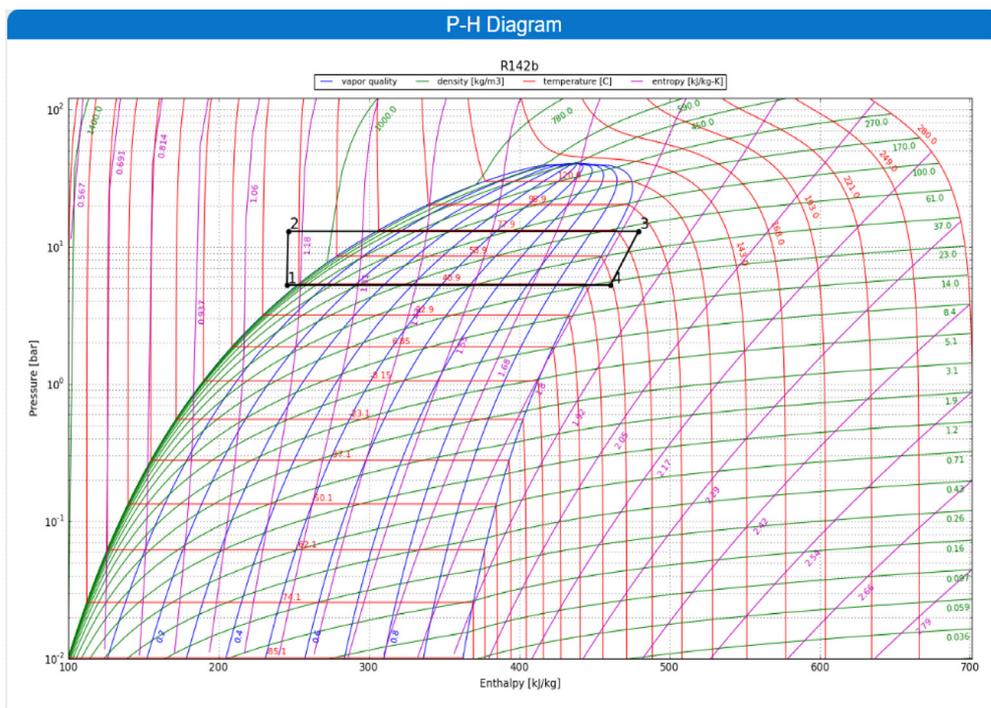


Рис. 3. P-H-диаграмма цикла установки ОЦР на 4 кВт

Fig. 3. P-H diagram of a 4 kW ORC installation cycle

Таблица 2. Параметры рабочего тела в ОЦР-контуре

Table 2. Parameters of the working fluid in the ORC circuit

Парметры\Точка процесса	1	2	3	4
Давление, МПа	0,523	1,3	1,3	0,523
Температура, °С	35	35,4	92	57,21
Энтальпия, кДж/кг	245,43	246,15	479,47	460,65
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1085,62	1087,75	479,47	460,65

Таблица 3. Технические параметры установки

Table 3. Technical parameters of the installation

Параметр	Значение
Температура источника тепла, °С	95
Мощность установки, кВт	4,0
КПД установки, %	10,006
Габариты, мм	2000 x 800 x 1500
Масса	150 кг

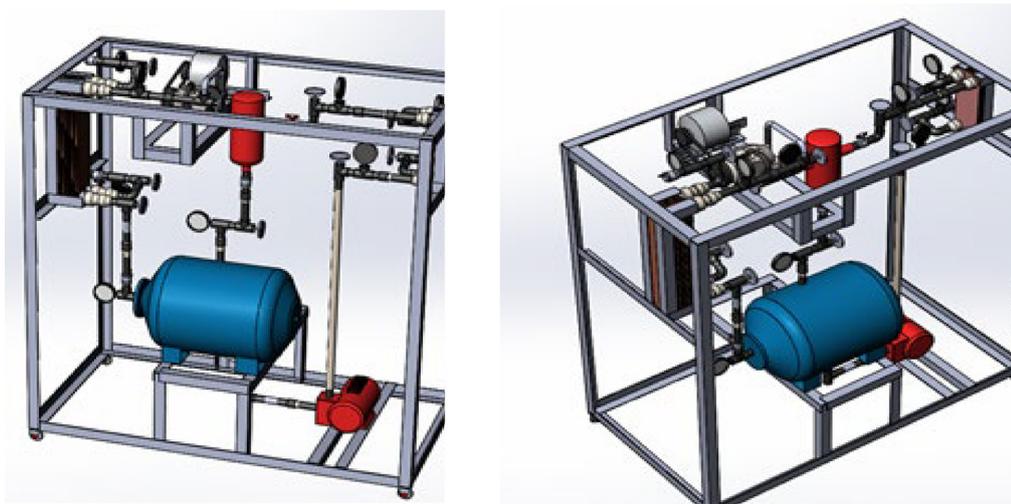


Рис. 4. Модель установки ОЦР на 4 кВт

Fig. 4. 4 kW ORC installation model



Рис. 5. Экспериментальная установка ОЦР на 4 кВт

Fig. 5. Experimental installation of a 4 kW ORC

### Анализ результатов экспериментальных исследований термодинамических процессов

Эффективность работы установки ОЦР мощностью 4 кВт на фреоне R142b зависит от температуры греющей среды и нагрузки. Экспериментальные исследования показали, что при снижении нагрузки менее 50 % эффективность установки снижается, а при нагрузке менее 30 % установка перестает работать.

На рис. 6 и 7 представлены зависимости эффективности установки от температуры греющей среды и нагрузки. Анализ показал, что минимальная температура насыщения фреона в испарителе, при которой происходит полное поглощение подводимой теплоты, составляет 92 °С (рис. 8).

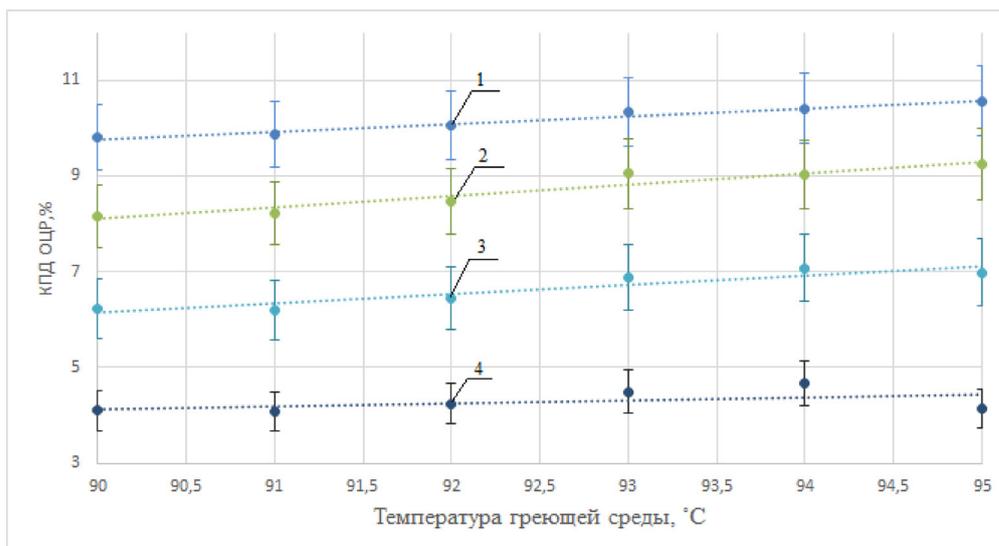


Рис. 6. Зависимость эффективности ОЦР от температуры греющей среды и нагрузки: 1 – нагрузка 100 %; 2 – нагрузка 80 %; 3 – нагрузка 60 %; 4 – нагрузка 40 %

Fig. 6. Dependence of the ORC efficiency on the temperature of the heating medium and the load: 1–100 % load; 2–80 % load; 3–60 % load; 4–40 % load

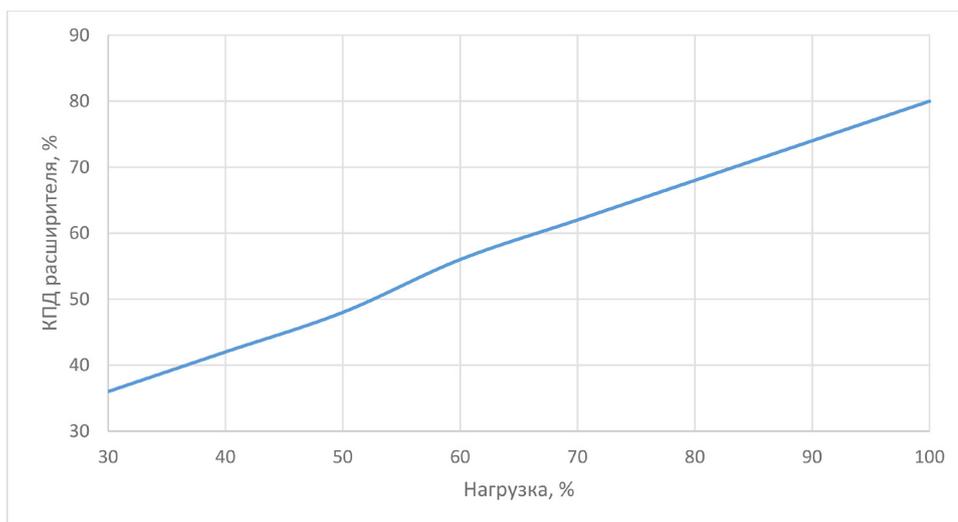


Рис. 7. Влияние нагрузки на КПД расширителя при температуре испарения 85–92 °С

Fig. 7. Effect of load on expander efficiency at an evaporation temperature of 85–92 °C

На рис. 9 и 10 представлены сравнения экспериментальных и теоретических значений эффективности установки в зависимости от температур греющей и охлаждающей сред. Погрешность измерений не превышает 5 %.

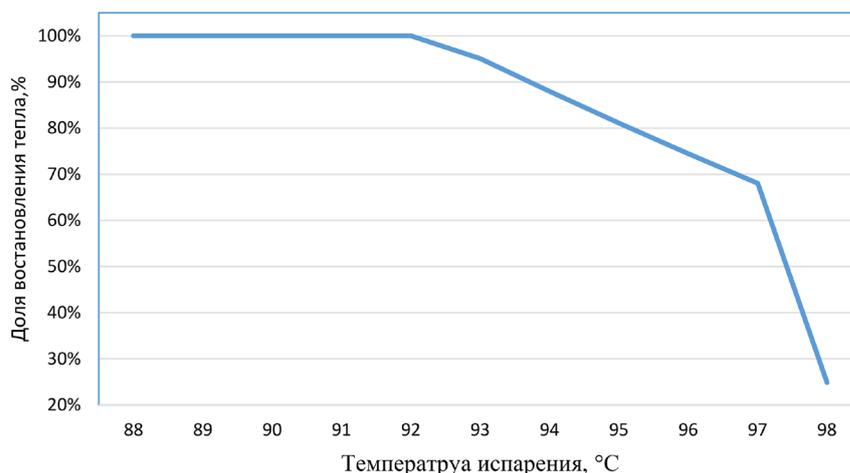


Рис. 8. Влияние температуры испарения фреона R142b на долю восстановления теплоты

Fig. 8. Effect of the evaporation temperature of freon R142b on the proportion of heat recovery

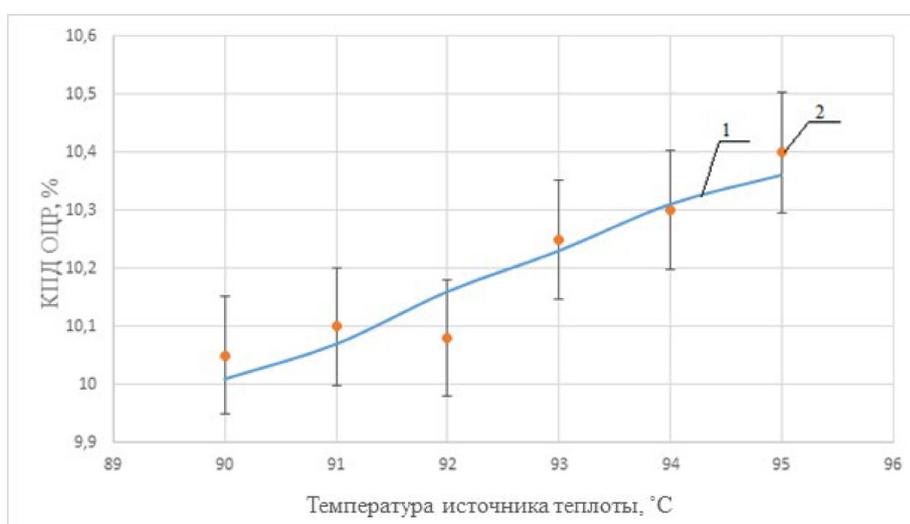


Рис. 9. Зависимость эффективности ОЦР от температуры источника теплоты: 1 – теоретические значения; 2 – экспериментальные значения

Fig. 9. Dependence of the ORC efficiency on the temperature of the heat source: 1 – theoretical values; 2 – experimental values

### Выводы

1. Конструкция установок ОЦР определяется режимными параметрами греющей и охлаждающей сред. При большой разнице температур между ними рекомендуется использовать промежуточный теплообменник – рекуператор.

2. Для установок ОЦР чаще всего используются «сухие» рабочие тела, степень сухости которых после расширения составляет 1.

3. Эффективность работы установки ОЦР в наибольшей степени зависит от эффективности расширителя, которая определяется его конструкцией и нагрузкой.

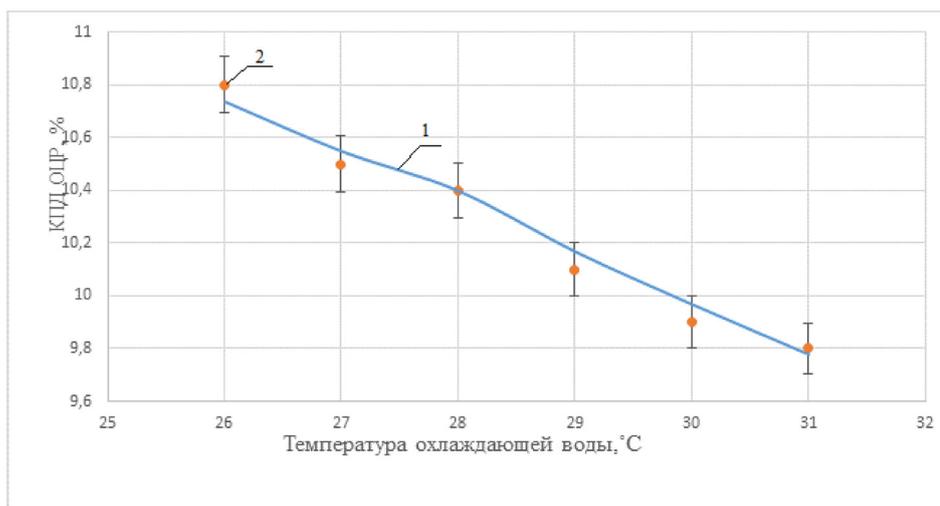


Рис. 10. Зависимость эффективности ОЦР от температуры охлаждающей воды: 1 – теоретические значения; 2 – экспериментальные значения

Fig. 10. Dependence of the efficiency of the ORC on the temperature of the cooling water: 1 – theoretical values; 2 – experimental values

4. Наибольшее влияние на эффективность установки оказывает температура охлаждающей среды.
5. Внедрение энергосберегающих технологий на основе ОЦР экономически целесообразно и требует развития отечественного производства.

#### Список литературы / References

- [1] Карабарин Д.И. *Повышение эффективности утилизации низкопотенциальной энергии теплотехнологических установок*: дис. канд. техн. наук: 05.14.04. Красноярск, 2021. 155 с. [Karabarin D. I. *Improving the efficiency of utilization of low-potential energy of heat technology installations*: dis. candidate of Technical Sciences: 05.14.04. Krasnoyarsk, 2021. 155 p. (In Rus.)]
- [2] Карабарин Д.И., Михайленко С.А. Особенности проектирования установок органического цикла Ренкина // *Журнал СФУ. Техника и технологии*. 2019, 12(6), 733–745 [Karabarin D. I., Mikhailenko S. A. Design features of Rankin organic cycle installations. *SibFU Journal. Engineering and technology*, 2019, 12(6), 733–745 (In Rus.)].
- [3] Bianchi M. A. De Pascale Bottoming cycles for electric energy generation: Parametric investigation of available and innovative solutions for the exploitation of low and medium temperature heat sources. *Applied Energy*, 2011, 88, 1500–1509.
- [4] Quoilin S., Lemort V., Lebrun J. Experimental study and modeling of an Organic Rankine Cycle using scroll. *Applied Energy*, 2010, 87, 1260–1268.
- [5] Galloni E., Fontana G., Staccone S. Design and experimental analysis of a mini ORC (organic Rankine cycle) power plant based on R 245fa working fluid. *Energy*, 2015, 90, 768–775.
- [6] *Прикладная программа для моделирования процессов ОЦР SmoWeb* [SmoWeb CRO process modeling application [Electronic resource]. URL: <http://platform.sysmoltd.com>.

EDN: CJPVNB

УДК 628.312.2

## Wastewater Conditioning of the Hydraulic Extraction System Using Cavitation Technology as a Basis for Reducing the Environmental Risks of Thermal Power Plants

Tatyana A. Kulagina\*, Olga G. Dubrovskaya,  
Vyacheslav I. Bashun and Sophia D. Dubrovskaya  
*Siberian Federal University  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 29.01.2025, received in revised form 04.02.2025, accepted 09.04.2025

**Abstract.** The results of a study on the use of non-reagent methods for purifying clarified water in closed hydrosol removal systems (hereinafter referred to as GMS) of thermal power plants are presented. Based on theoretical analysis and experimental studies, installations using cavitation technology have been proposed that simultaneously solve the problems of physico-chemical water purification and eliminate the deposition of insoluble salts in pipelines. The purpose of the research is to develop technological proposals and technical solutions for the modernization of classical settling ponds aimed at improving the efficiency of wastewater treatment. The efficiency of purification of clarified wastewater from thermal power plants in standard hydraulic structures – settling ponds does not meet the requirements for the quality of water purification established by Russian environmental legislation both for discharge into natural reservoirs and for the formation of a full-fledged recycled industrial water use. In this regard, it is advisable to develop and introduce into production alternative, non-reactive, and highly effective methods of treatment of multicomponent wastewater. Such methods include wastewater treatment based on the effects of hydrothermodynamic cavitation.

**Keywords:** cavitation, wastewater treatment, hydrosol removal system, process water, environmental risks.

Citation: Kulagina T. A., Dubrovskaya O. G., Bashun V. I., Dubrovskaya S. D. Wastewater Conditioning of the Hydraulic Extraction System Using Cavitation Technology as a Basis for Reducing the Environmental Risks of Thermal Power Plants. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2025, 18(3), 352–368. EDN: CJPVNB



© 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: tak.sfu@gmail.com

## Кондиционирование стока системы гидрозолоудаления с применением кавитационной технологии как основа снижения экологических рисков ТЭЦ

Т. А. Кулагина, О. Г. Дубровская,  
В. И. Башун, С. Д. Дубровская  
*Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск*

**Аннотация.** Изложены результаты исследования применения безреагентных методов очистки осветленной воды замкнутых систем гидрозолоудаления (далее ГЗУ) теплоэнергетических станций. На основании теоретического анализа и экспериментальных исследований предложены установки, использующие кавитационную технологию, позволяющую одновременно решать проблемы физико-химической очистки воды и исключать отложение нерастворимых солей в трубопроводах. Целью исследования является разработка технологических предложений и технических решений модернизации классических прудов-отстойников, направленных на повышение эффективности очистки стока ГЗУ. Эффективность очистки осветленных вод ГЗУ предприятий теплоэнергетического комплекса в стандартных гидротехнических сооружениях – прудах-отстойниках не отвечает требованиям к качеству очистки воды, установленным российским экологическим законодательством, как для сброса в природные водоемы, так и для формирования полноценного оборотного промышленного водопользования. В связи с этим целесообразно разрабатывать и внедрять в производство альтернативные, безреагентные и высокоэффективные методы очистки многокомпонентных сточных вод. К таким методам можно отнести очистку стока, основанную на эффектах гидротермодинамической кавитации.

**Ключевые слова:** кавитация, очистка сточных вод, система гидрозолоудаления, техническая вода, экологические риски.

Цитирование: Кулагина Т. А. Кондиционирование стока системы гидрозолоудаления с применением кавитационной технологии как основа снижения экологических рисков ТЭЦ / Т. А. Кулагина, О. Г. Дубровская, В. И. Башун, С. Д. Дубровская // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(3). С. 352–368. EDN: CJPVNB

### Введение

В настоящее время природоохранное законодательство как Российской Федерации, так и других стран мира предъявляет жесткие требования к методам кондиционирования промышленных сточных вод. Данные требования направлены как на снижение негативного экологического воздействия промышленных стоков на водные объекты, так и на сокращение изъятия пресной воды из природных водоемов за счет формирования замкнутого водопользования. При этом к современным технологиям очистки сточных вод предъявляются требования не только по высоким показателям эффективности, но и по снижению, а в ряде случаев исключению применения реагентов, снижению или исключению побочных продуктов очистки – осадков. Большинство крупных предприятий поддерживают и реализуют переход к оборотному водопользованию, соответственно, пересматривают низкоэффективные стандартные методы кондиционирования промышленного стока и находятся в поиске альтернативных методов очистки сточной воды.

Вода в энергетических комплексах находит широкое применение. Технически подготовленную воду используют для охлаждения маслоохладителей, конденсаторов, некоторых других

аппаратов; для питания парогенераторов; для гидравлического удаления золы; для тепловых сетей и для гидроуборки помещений. Все эти технологические процессы образуют различные по своему составу стоки. К ним относятся: регенерационные и шламовые стоки химводоочисток; сбросные воды систем гидрозолоудаления; обмывочные воды поверхностей парогенераторов и оборудования; охлаждающие воды; возвращаемый с предприятий конденсат; воды, загрязненные нефтепродуктами; отработавшие растворы после химических промывок. Количество и качество этих стоков различны; они зависят от мощности ТЭС, ее назначения, вида топлива, состава исходной используемой воды и других факторов.

В зависимости от мощности турбин и применяемых параметров пара удельный расход воды на ТЭС составляет 0,1–0,25 м<sup>3</sup>(кВт·ч). В дальнейшем по мере повышения установленной мощности и параметров пара этот расход уменьшится до 0,08–0,105 м<sup>3</sup>(кВт·ч). Подавляющая часть этой воды (85–95 %) идет на конденсацию пара, охлаждение масла и воздуха (3–8 %), и восполнение потерь в охлаждающей воде достаточно велико. Так, расход охлаждающей воды для конденсатора турбины К-300–240 составляет около 12 м<sup>3</sup>/с, для блока 500 МВт составит 16–17 м<sup>3</sup>/с, для ТЭС мощностью 1200 МВт расход составит около 46–47 м<sup>3</sup>/с.

Сточные воды ТЭС являются наиболее распространенными загрязнителями техногенного происхождения водоисточников хозяйственно–питьевого и рыбохозяйственного назначения. Такими загрязнителями являются: нефтепродукты с концентрацией примерно 1–2 мг/л (превышение для источников хозяйственно и рыбохозяйственного назначения в 3,5–8 раз); фенолы – примерно 0,2–0,3 мг/л (в 200–300 раз выше нормы); аммонийный азот – примерно 10 мг/л (в 4–5 раз выше нормы); синтетические ПАВ – примерно 4–5 мг/л (в 8–100 раз); соединения тяжелых металлов – около 0,15–0,3 мг/л (в 2–6 раз) [7–9, 11, 17, 18].

В процессе эксплуатации ТЭС охлаждающие воды обычно ничем не загрязняются, если к ним не подмешивают какие-либо посторонние стоки. Однако температура охлаждающей воды обычно на 5–10 °С выше температуры в водоисточнике. Такое тепловое воздействие негативно сказывается на биоценозе природных вод, вследствие чего многие ТЭС используют замкнутое охлаждение. При охлаждении на градирнях значительные количества циркулирующей воды испаряется; некоторая часть уносится в виде брызг и отводится в продувку. Такая продувочная вода имеет несколько более высокую концентрацию солей по сравнению с добавляемой в систему.

Регенерационные и шламовые воды химводоочисток содержат различные кальциевые и натриевые соли преимущественно серной и соляной кислот, а также осадки, состоящие из гидроксидов железа и алюминия, кремнекислоты органических веществ, карбонаты кальция и магния.

Воды, загрязненные нефтепродуктами (в основном маслами и мазутом), возникают при гидроуборке помещений вследствие проливов и утечек масел и жидкого топлива.

Очень различным составом обладают отработавшие растворы после химических промывок теплосилового оборудования. В качестве основных реагентов для удаления монтажного шлама и различных эксплуатационных отложений применяют соляную кислоту, различные органические кислоты. Такие стоки содержат в основном продукты растворения и соединений *Mg*, *Ca*, *Zn*, *Cu*, *Fe* и т.д., а также шлам.

Таким образом, составы всех стоков ТЭС, кроме охлаждающих вод, недопустимо сбрасывать в природные водоёмы. Обезвреживание этих вод технологически возможно, но нецелесообразно по следующим причинам.

Во-первых, обезвреживание вод потребует значительных капиталовложений, высококвалифицированных сотрудников, больших эксплуатационных расходов. На современной ТЭС количество нефтесодержащих вод составляет 100–200 м<sup>3</sup>/ч, что потребует эксплуатационных расходов в размере от 4,6 до 11,5 млн руб/год, по разным оценкам, стоимость такой очищенной воды достигнет 9,2 руб/м<sup>3</sup>. Следовательно, расходы на очистку только нефтесодержащих стоков всех станций составят миллиарды рублей в год. Еще большие затраты потребуются для обезвреживания сбросных вод систем ГЗУ, несмотря на простоту технологии очистки этих вод от токсичных примесей. По разным оценкам, эксплуатационные расходы при очистке таких вод составят около 5,7–8 руб/м.

Так как на ТЭС за год из систем ГЗУ сбрасывается несколько миллиардов кубометров воды, то годовые расходы на очистку даже части этих вод составят десятки миллиардов рублей.

Во-вторых, другим важным фактором, заставляющим считать малоперспективной организацию обезвреживания сточных вод ТЭС для сброса в рыбохозяйственные водоемы, являются постоянно ужесточающиеся требования к очистке такой воды. Это следствие еще недостаточной изученности различных загрязняющих веществ на биоценоз природных вод. С течением времени требования органов охраны постоянно ужесточаются и расширяются, охватывая новые вредные примеси. Следовательно, методы очистки и обезвреживания стоков будут в дальнейшем недостаточными.

В-третьих, номенклатура материалов, используемых энергетикой, постоянно расширяется. Увеличивается также и перечень веществ, применяемых для регулирования водно-химического режима. Как следствие, в некоторых стоках появляются все новые соединения. Следует также учитывать вещества, присутствующие в конденсатах, возвращаемых на ТЭС от производственных потребителей пара, например нефтеперегонных и различных химических предприятий.

Таким образом, технология очистки, технологические схемы и конструкции используемых сооружений, установок, аппаратов и механизмов должны будут все время изменяться в соответствии с вводимыми требованиями к качеству и к расширяющимся перечням вредных примесей. Все это позволяет считать создание бессточных систем теплоэлектростанций наиболее перспективным на сегодняшний день.

При эксплуатации угольных электростанций остро встает вопрос об интенсификации очистки воды систем гидрозолоудаления. Во-первых, нужно учитывать большой объем используемой воды для смыва золы (производительность одного багерного насоса может достигать 1250 м<sup>3</sup> в час), во-вторых, стандартным методом отстаивания в прудах не достигается требуемое качество воды для сброса в природные водоемы в соответствии с нормативно-правовой базой РФ, в-третьих, концентрации ряда химических веществ в очищенном стоке не соответствуют качественным показателям технической воды. Еще одной проблемой является формирование стойких отложений во внутреннем контуре трубы при водной транспортировке золошлаков, вызываемых перенасыщением воды оксидами и гидроксидами металлов. Концентрация подобных примесей может достигать тысячи миллиграммов на кубический метр, а водородное число (рН) может колебаться от кислой до высокощелочной реакции [3]. Состав и концентрации загрязнителей зависят от марки сжигаемого топлива и свойств золы и шлака, и определяются путем исследования в лаборатории.

Ранее говорилось о том, что основными сооружениями первичного накопления и отстаивания сточных вод ГЗУ являются пруды-отстойники. Однако существует ряд экологических рисков, вызванных несовершенством конструктивно-эксплуатационных характеристик данных сооружений. Основной экологический риск связан с неизбежным накоплением избыточной воды в секциях золоотвала до опасных уровней и последующим сбросом осветленных вод в прилегающий водоем [5]. При сбросе данных стоков может оказываться существенное негативное влияние на природные водные объекты, за счет повышения общей минерализации, насыщения ионами тяжелых металлов и нефтепродуктами и др. Ряд загрязнителей, таких как тяжелые металлы, аккумулируются в донных отложениях [6]. Решение этой проблемы возможно с применением метода гидротермодинамической кавитации и при использовании данной технологии при очистке сточных вод ГЗУ.

Цель работы – выявление закономерностей модифицирования физико-химических параметров воды под воздействием гидротермодинамической кавитации, научное обоснование и разработка безреагентной технологии очистки оборотных вод ГЗУ.

### **Метод или методология проведения работы**

Методологической базой являются экспериментальные методы термодинамических, кинетических, технологических исследований. В качестве эмпирической базы исследования применены лабораторные и стендовые полупромышленные кавитационные установки. При исследовании эффективности очистки стока использовались стандартные аттестованные методики лабораторно-аналитической оценки качества воды. Методы VBA-математического моделирования и интерпретации результатов исследования позволили определить оптимальные режимы кавитационной обработки исследуемой воды.

### **Результаты исследования и их обсуждение**

Изменение физико-химических свойств жидкости при гидротермодинамическом кавитационном воздействии основано на высокой концентрации (кумуляции) энергии в очень небольшом объеме газообразной и жидкой среды с последующим ее высвобождением в критически малом временном периоде.

Суть гидродинамического воздействия может быть сведена к действию двух основных механизмов: распространению ударных волн вблизи схлопывающегося кавитационного микропузырька и ударному воздействию кумулятивных микроструек при несимметричном коллапсе кавитационных микропузырьков [7]. В окрестности схлопывающегося пузырька образуются высокие теплофизические параметры ( $P \sim 1000$  атм;  $T \sim 2000$  К и более) [7, 8, 11], при этом изначально крупные фракции загрязнителей разбиваются на более лёгкие с последующим окислением до конечных продуктов, образуются активные радикалы и в небольшом количестве пероксид водорода и озон, обеспечивающие длительный окислительный эффект.

Изменение условий проведения технологических процессов существенно влияет на интенсивность кавитационного воздействия, а следовательно, и на скорость протекания соответствующего физико-химического процесса. Например, снижение температуры и давления насыщенных паров, а также наличие в системе твердых частиц повышает интенсивность кавитационного воздействия.

Время кавитационной обработки влияет на конечный результат, но не всегда увеличение времени обработки ведет к увеличению технологического эффекта. Поэтому, применяя гидродинамическую кавитацию, необходимо учитывать не только физические свойства жидкостей, но и условия проведения конкретного технологического процесса: давление, температуру, длительность обработки, степень турбулентности потоков, наличие твердых частиц и т.д.

В качестве объекта исследования использовались осветленные сточные воды системы ГЗУ, основные физико-химические показатели которых получены на основании количественного химического анализа (КХА). Исходные концентрации загрязнителей приведены в табл. 2.

Степень и виды загрязнителей сточной воды гидрозолоудаления напрямую зависят от состава золы и, как правило, данный физико-химический состав имеет сильные колебания, особенно при сгорании бурых углей. Это связано с неоднородностью химического и минералогического состава разных пластов месторождения угля, нестабильностью состава, особенно повышенным содержанием оксида кальция и магния, количество которых в отдельных золах достигает 23 %, а также строением в зависимости от режима сжигания топлива, в одном случае – больше оплавленной стекловидной фазы, в другом – повышенная пористость. Таким образом, неоднородность определяется различием химического и минералогического состава углей, режимом сжигания – количеством оплавленной стекловидной фазы, местом отбора золы и др.

Для достижения поставленной цели и возможности регулировать параметры кондиционирования стока ГЗУ исследованы золы Красноярских ТЭС. Химический, минералогический и фазовый составы зол зависят от вида сжигаемого угля, условий его сжигания, способа улавливания и отбора зол из шлаков [17]. Химический анализ отобранных в 2023–2024 гг. зол Красноярских ТЭС приведен в табл. 1.

В зависимости от химического состава золы делятся по модулю основности на два класса: 1-й –  $M_o = 0,6–1,5$ , 2-й –  $M_o < 0,6$ . По этому показателю золы ТЭЦ-2 ( $M_o=0,73$ ) относятся к 1

Таблица 1. Химический состав зол Красноярских ТЭС

Table 1. Chemical composition of the ashes of Krasnoyarsk thermal power plants

Наименование показателя	Содержание, % по массе		
	Зола Красноярской ТЭЦ-1	Зола Красноярской ТЭЦ-2	Зола Красноярской ТЭЦ-3
SiO <sub>2</sub>	68,8	35,6	48,8
CaO	15,2	28,73	23,0
CaO <sub>св</sub>	3	4,71–12,06	5,2
MgO	3,82	3,44	4,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,57	8,8	9,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,22	8,21	8,2
SO <sub>3</sub>	0,93	3,9	0,7
K <sub>2</sub> O	0,45	0,4	0,6
Na <sub>2</sub> O	0,18	0,6	0,3
Хлориды	< 0,01	10,2	5,2

классу, а золы ТЭЦ-1 и ТЭЦ-3 ( $M_o=0,25$  и  $0,47$  соответственно) относятся ко 2 классу. Основным оксидом, характеризующим золы как основные или кислые, является  $CaO$  [19, 20]. В каменных углях с преобладанием  $SiO_2$  золы получаются кислыми, с суммарным содержанием кислых оксидов около 80 % и более, с низким модулем основности, характеризуются пуццолановой активностью. Их используют как пуццолановую добавку либо как инертный материал.

При сжигании бурых углей Канско–Ачинского энергетического бассейна образуется высокое количество  $CaO$ . Такие золы отличаются гидравлической активностью, имеют высокий модуль основности и делятся по химическому составу на:

- среднекальциевые – содержание  $CaO_{общ.}$  20–30 % и  $CaO_{своб.}$  < 3 %;
- высококальциевые – содержание  $CaO_{общ.}$  30–45 % и  $CaO_{своб.}$  до 9 %;
- ультравысококальциевые – содержание  $CaO_{общ.}$  > 45 % и  $CaO_{своб.}$  > 10 %.

По содержанию оксида кальция золы Красноярских ТЭЦ относят в среднекальциевым, однако необходимо отметить наличие в золе ТЭЦ-2 высокого содержания свободного  $CaO$ , что, с одной стороны, характеризует гидравлическую активность (возможность использования для производства бесклинкерных вяжущих), а с другой – при наличии стеклянной оболочки может привести к «разрушению структуры бетона во времени, вследствие гашения извести, образования этtringита, нежелательных щелоче-кремнеземных реакций.

Для определения зависимости химического состава от режима обработки зольных композиций проводили рентгенофазовый анализ образцов, полученных при разной длительности обработки, результаты которых представлены на рис. 1.

Как упоминалось выше, в качестве альтернативного метода очистки воды предложен способ гидротермодинамической кавитации. При этом использовали две независимые линии исследований (табл. 2).

В лаборатории обработка осветленной воды проводилась в трех режимах. В качестве оборудования был использован высокоскоростной лабораторный смеситель Silverson L5M с головкой высокого сдвига. После каждого этапа кавитационной обработки воды производился химический анализ образца. Данные химического анализа исходной и обработанной проб воды представлены в табл. 3, и на диаграмме рис. 2 отображены изменения эффективности кондиционирования стока ГЗУ по основным маркерным показателям.

После выявления оптимального режима кавитационной обработки осветленного стока ГЗУ был проведен сравнительный анализ эффективности извлечения ионов металлов реагентным методом и методом гидротермодинамической кавитации. Результаты представлены в табл. 4 и на рис. 3.

Доказано [7–11], что в условиях гидротермодинамической кавитации протекают сложные физико-химические процессы, классифицируемые следующим образом:

- окислительно-восстановительные реакции с участием присутствующих в водной среде органических и неорганических веществ за счет образования в растворе  $H_2O_2$ ,  $O_2$ ,  $O_3$ ,  $O$  и  $OH$ ;
- цепные реакции в растворе, инициируемые продуктами расщепления присутствующих в растворе примесей;
- деструкция макромолекул и инициирование деполимеризации полимерных соединений;
- реакции между растворенными газами внутри кавитационных пузырьков.

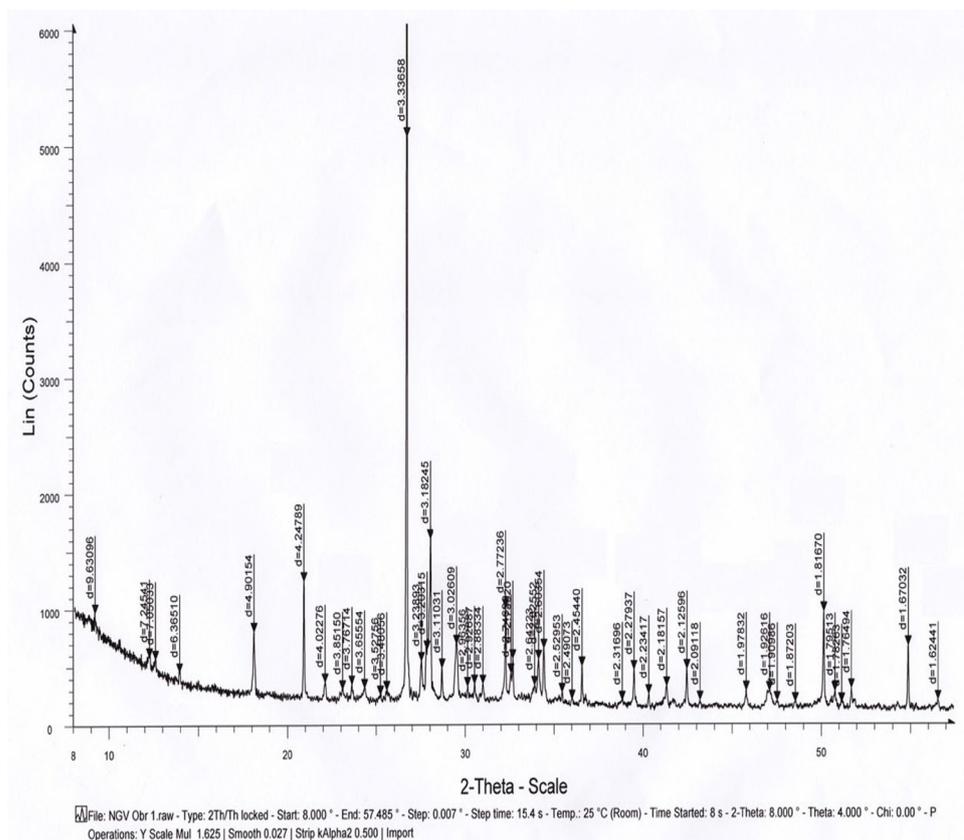


Рис. 1. Диффрактограмма золы, выделяемой из системы ГЗУ

Fig. 1. Diffractogram of ash released from the GZU system

Таблица 2. Физико-химические показатели осветленной воды

Table 2. Physico-chemical parameters of clarified water

Показатель, ед. изм.	Методика определения	Значение фактического показателя
Сухой остаток, мг/дм <sup>3</sup>	ПНДФ 14.1:2.4.261–2010	912,00
Сульфат-ион, мг/дм <sup>3</sup>	ПНДФ 14.1:2.159–2000	80,50
Гидрокарбонат-ион, мг/дм <sup>3</sup>	ПНД Ф 14.2.99–97	менее 6,1
Карбонат-ион, мг/дм <sup>3</sup>	ГОСТ 31957–2012	1206,00
Водородный показатель, ед. рН	ПНДФ 14.1:2:3:4.121–1997	12,12
Общая жёсткость, °Ж	ПНДФ 14.1:2.98–97	17,84

Помимо явного преимущества кавитационной технологии при удалении тяжелых металлов из осветленной воды ГЗУ следует обратить внимание и на то, что при реагентном методе для удаления комплекса металлов требуется доведение рН среды до значений 10,5–12,0, что, безусловно, влечет за собой повышенное использование реагентов. Образующиеся при этом нерастворимые осадки (как правило, гидроксиды металлов) подвержены длитель-

Таблица 3. Концентрации примесей исходной и обрабатываемой воды

Table 3. Concentrations of impurities in the source and treated water

Показатель, ед. изм	Исходная проба	Обработанная проба		
		1 режим*	2 режим**	3 режим***
Сухой остаток, мг/дм <sup>3</sup>	912,00	1044,00	1002,00	1112,00
Сульфат – ион, мг/дм <sup>3</sup>	80,50	83,50	77,20	62,50
Гидрокарбонат-ион, мг/дм <sup>3</sup>	менее 6,1	менее 6,1	менее 6,1	менее 6,1
Карбонат-ион, мг/дм <sup>3</sup>	1206,00	768,00	864,00	730,10
Водородный показатель, ед. рН	12,12	12,02	10,21	8,55
Общая жесткость, °Ж	17,84	12,72	13,04	9,92

\* 1 режим – 10 мин 5000 об/мин; \*\* 2 режим – 10 мин 7000 об/мин; \*\*\* 3 режим – 10 мин 10000 об/мин



Рис. 2. Динамика изменения эффективности кондиционирования стока ГЗУ при различных режимах кавитационной обработки

Fig. 2. Dynamics of changes in the efficiency of conditioning of the GZU drain under various modes of cavitation treatment

ной седиментации и обводнены на 60–75 %, как следствие, усложняется технология удаления и обработки подобных осадков сточных вод.

Анализируя, полученные экспериментальные данные, с целью определения оптимального режима кавитационной обработки промышленного стока был выбран метод математического моделирования с совокупностью методик визуального программирования – VBA, сочетаемого с вычислительными возможностями Excel. Результат отображен на рис. 3.

На основании матриц изменения концентрации ионов тяжелых металлов в очищаемой сточной воде и полученных зависимостей от таких факторов, как скорость вращения кавитационной крыльчатки, время обработки, рН среды, температуры среды, получены уравнения

Таблица 4. Сравнительный анализ методов кондиционирования стока ГЗУ по эффективности удаления ионов металлов

Table 4. Comparative analysis of the methods of conditioning the effluent by the efficiency of removal of metal ions

Ион	Исходная концентрация мг/дм <sup>3</sup>	Концентрация ионов после различных методов обработки стока						
		Реагентный метод				Метод кавитации при 10000 об/мин/t мин		
		10 мин	15 мин	30 мин	Эффект, %	10 мин	15 мин	Эффект, %
Cu	3,94	3,75	3,75	3,55	9,8	2,75	1,15	70,8
Fe	13,7	12,66	10,7	5,6	59,12	2,66	0,64	95,3
Mg	408,5	334,9	288,07	96,9	76,27	37,25	16,25	94,54
Mn	0,032	0,022	0,022	0,022	31,25	0,017	0,017	46,8

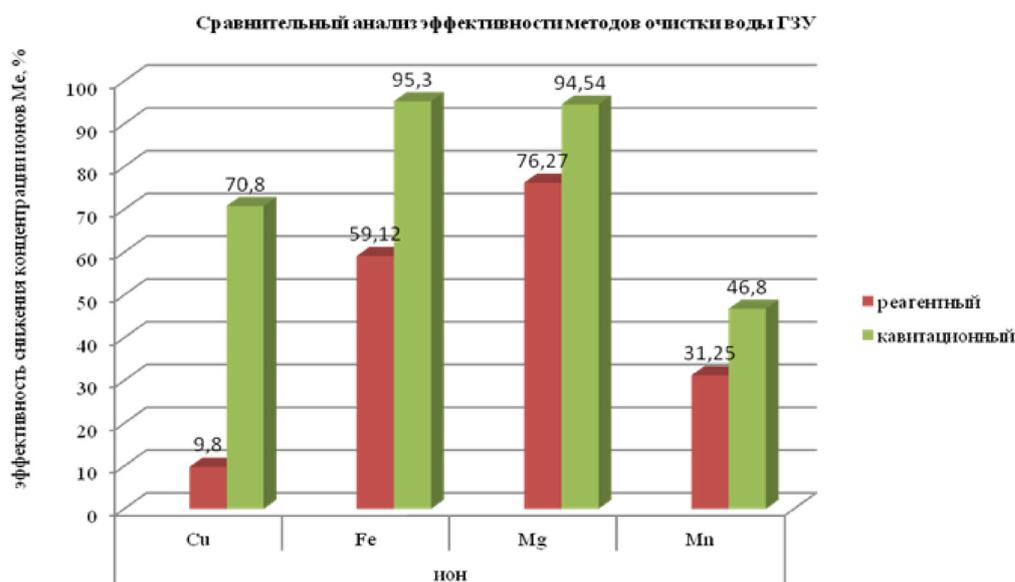


Рис. 3. Сравнительный анализ эффективности методов удаления ионов Me из стока ГЗУ

Fig. 3. Comparative analysis of the effectiveness of methods for removing Me ions from the effluent

регрессии второго порядка. По уравнениям регрессии получены графические интерпретации в виде поверхностей (рис. 3), что позволяет регулировать процесс безреагентного кондиционирования сточных вод, содержащих тяжелые металлы, и учитывать в дальнейшем технико-экономические показатели. При обсчете данных использован алгоритм оценки коэффициентов нелинейной регрессионной модели методом наименьших квадратов. Представлен оценочный критерий  $y_{1-2}$  в факторном пространстве следующих параметров:  $x_1$ ;  $x_2$ ;  $x_3$ . На рис. 4 представлена регулировочная диаграмма очистки стока на примере иона меди.

Интерпретируя результаты математического моделирования и сопоставляя их с фактическими изменениями концентраций ионов тяжелых металлов при различных режимах гидротермодинамической обработки модели сточной воды, можно сделать вывод, что режимом

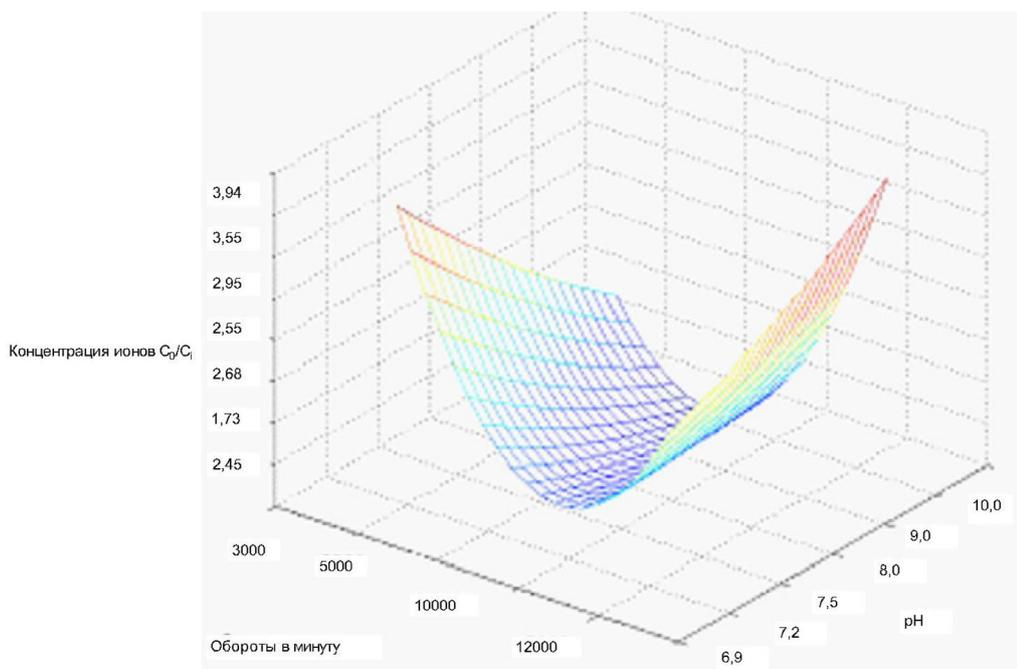


Рис. 4. Регулировочная диаграмма процесса очистки сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов (на примере иона  $\text{Cu}^{2+}$ ), методом кавитационной обработки

Fig. 4. Adjustment diagram of the wastewater treatment process containing heavy metal ions (using the  $\text{Cu}^{2+}$  ion as an example) by cavitation treatment

оптимальности для удаления комплекса ионов тяжелых металлов является обработка при 10000 оборотов в минуту в течение 60 секунд. При более интенсивном режиме кавитационного воздействия наблюдается образование промежуточных продуктов окисления металлов и перекомбинация активных ионов в водной среде с образованием скоагулированных структур в виде гидроксидов металлов, например  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , или же гидроксоаквакомплексов, таких как  $[\text{Cu}(\text{OH})_2(\text{OH})_2]^0$ ,  $[\text{Zn}(\text{OH})_2(\text{OH})_2]^0$ ,  $[\text{Ni}(\text{OH})_2(\text{OH})_2]^0$ ,  $[\text{Ni}(\text{OH})_4(\text{OH})_2]^0$ ,  $[\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{OH})_3]^0$ ,  $[\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{OH})_3]^0$ . Данные вещества, в свою очередь, обладая силой электростатического притяжения за счет изменения заряда комплексона – от положительного до отрицательного (при pH свыше 10.0), выступают коагулянтами. Образующийся скоагулированный осадок в рамках данного исследования также был проанализирован. Определены размеры частиц осадка турбидиметрическим и седиментационным методами анализа. Так, размер хлопьев осадка, скоагулированных на гидроксоаквакомплексах Ni, Cu, Zn, достигает 130–140 нм, тогда как хлопья осадка, образующиеся и седиментированные на комплексах иона  $\text{Fe}^{3+}$ , составляют от 24 до 50 мкм.

Учитывая необходимость обработки большого объема стока ГЗУ, целесообразно разработать либо систему проточного кавитационного реактора, устанавливаемого непосредственно в трубопровод, либо применять погружной кавитационный реактор как элемент кондиционирования части осветленной воды ГЗУ, отводимой для сброса в природный водоем или возвращаемой на предприятие в качестве технической воды при возникновении положительного баланса. Принципиальная схема представлена на рис. 5.

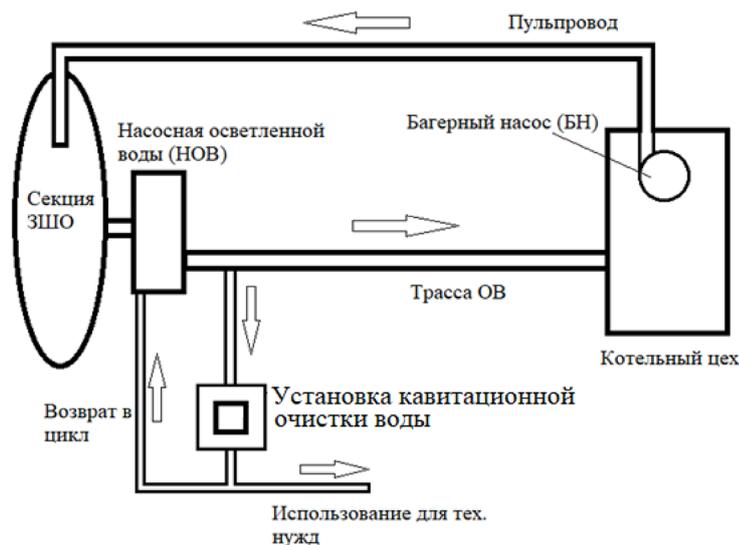


Рис. 5. Принципиальная схема системы ГЗУ с установкой кавитационной очистки воды

Fig. 5. Schematic diagram of a GZU system with a cavitation water purification unit

С точки зрения экономической целесообразности внедрения предлагаемой схемы очистки с внедрением узла кавитационной дезинтеграции сточных вод предприятий тепло-энергетического комплекса следует исходить из значительного снижения экологических платежей.

Так, основные принципы исчисления размера вреда, причиненного водным объектам, основаны на выявлении фактов нарушения водного законодательства, наступление которых устанавливается по результатам государственного контроля и надзора в области использования и охраны водных объектов на основании натурных обследований, инструментальных определений, измерений и лабораторных анализов.

Исчисление размера вреда основывается на компенсационном принципе оценки и возмещения размера вреда по величине затрат, необходимых для установления факта причинения вреда и устранения его причин и последствий, в том числе затрат, связанных с разработкой проектно-сметной документации, и затрат, связанных с ликвидацией допущенного нарушения и восстановлением состояния водного объекта до показателей, наблюдаемых до выявленного нарушения, а также для устранения последствий нарушения.

Исчисление размера вреда может осуществляться исходя из фактических затрат на восстановление нарушенного состояния водного объекта, а также в соответствии с проектами восстановительных работ.

Исчисление размера вреда водному объекту исходя из фактических затрат осуществляется на основании данных о стоимости основных видов работ и (или) фактически произведенных расходах по следующим основным мероприятиям и работам:

- проведение анализов качества вод и донных отложений водного объекта;
- расчет затрат или разработка проектно-сметной документации по устранению последствий нарушения водного законодательства;

- мероприятия по оценке распространения загрязняющих веществ в водном объекте и последующего их влияния на использование водного объекта для водоснабжения, рекреации и иных целей водопользования;
- мероприятия по предупреждению распространения загрязнения на другие участки водного объекта или на другие водные объекты;
- строительство временных зданий и сооружений, использованных при осуществлении работ по ликвидации последствий нарушения водного законодательства;
- сбор, удаление, утилизация загрязняющих веществ, нефти, нефтесодержащих веществ, отходов производства и потребления, фильтрующего материала и иных материалов, использованных при ликвидации последствий нарушения водного законодательства;
- подъем затонувших судов и иных предметов;
- мероприятия по предотвращению попадания в водный объект загрязняющих веществ и отходов с водосборной площади;
- очистка донных отложений водного объекта от загрязняющих веществ;
- мероприятия по очистке и восстановлению водоохраных зон и прибрежных защитных полос водных объектов.

Исчисление размера вреда производится с учетом факторов, влияющих на его величину, к которым относятся: состояние водных объектов, природно–климатические условия, длительность и интенсивность воздействия загрязняющих веществ на водный объект.

Исчисление размера вреда, причиненного водному объекту, осуществляется независимо от того, проводятся мероприятия по устранению нарушения и его последствий непосредственно вслед за фактом нарушения или будут проводиться в дальнейшем в соответствии с программами по использованию, восстановлению и охране водных объектов, а также программами социально-экономического развития регионов.

Размер вреда, причиненного водному объекту сбросом загрязняющих веществ в составе сточных вод и (или) дренажных (в том числе шахтных, рудничных) вод, производится в соответствии с действующей методикой, предусмотренной Приказом Минприроды России от 13 апреля 2009 г. № 87 «Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства (с изменениями на 26 августа 2015 г.)».

Таксы для исчисления размера ущерба утверждены Постановлением Правительства РФ от 03.11.2018 № 1321 «Об утверждении такс для исчисления размера ущерба, причиненного водным биологическим ресурсам».

В соответствии с п. 11 методики № 87 исчисление размера вреда, причиненного водному объекту сбросом вредных (загрязняющих) веществ в составе сточных вод и (или) дренажных (в том числе шахтных, рудничных) вод, производится по формуле (1)

$$Y = K_{BG} \times K_B \times K_{ИН} \times H_i \times M_i \times K_{ИЗ}, \quad (1)$$

где  $Y$  – размер вреда, тыс.руб.;  $K_{BG}$  – коэффициент, учитывающий природно-климатические условия в зависимости от времени года, определяется в соответствии с табл. 1 прил. 1 к методике;  $K_B$  – коэффициент, учитывающий экологические факторы (состояние водных объектов), определяется в соответствии с табл. 2 прил. 1 к методике;  $K_{ИН}$  – коэффициент индексации,

учитывающий инфляционную составляющую экономического развития, определяется в соответствии с п. 11.1 настоящей методики;  $N_i$  – таксы для исчисления размера вреда от сброса  $i$ -го вредного (загрязняющего) вещества в водные объекты определяются в соответствии с табл. 3 прил. 1 к методике, тыс.руб./т;  $M_i$  – масса сброшенного  $i$ -го вредного (загрязняющего) вещества определяется по каждому загрязняющему веществу в соответствии с главой IV настоящей методики, т;  $K_{из}$  – коэффициент, учитывающий интенсивность негативного воздействия вредных (загрязняющих) веществ на водный объект, определяется в соответствии с пунктом 11.2 методики.

Согласно п. 11.2 коэффициент  $K_{из}$ , учитывающий интенсивность негативного воздействия вредных (загрязняющих) веществ на водный объект, устанавливается в зависимости от кратности превышения фактической концентрации вредного (загрязняющего) вещества при сбросе на выпуске сточных, дренажных (в том числе шахтных, рудничных) вод над его фоновой концентрацией в воде водного объекта. Указанный коэффициент принимается в размере: рассчитанной кратности превышения для вредных (загрязняющих) веществ I–II классов опасности; для вредных (загрязняющих) веществ III–IV классов опасности: равном 1 при превышениях до 10 раз; равном 2 при превышениях более 10 и до 50 раз; равном 5 при превышениях более 50 раз.

Размер вреда, исчисленный по формуле 1, уменьшается на величину фактической оплаты сверхнормативного или сверхлимитного (при его наличии) сброса загрязняющих веществ, который рассчитывается исходя из массы загрязняющих веществ, учитываемых за период времени, принятый при оценке вреда.

Таким образом, произведя расчет возмещения ущерба только по маркерным показателям и в сравнении с традиционной схемой очистки, очевидна эколого-экономическая эффективность внедрения узла кавитационной обработки стока ГЗУ:

$$Y_1 = 1.36 \times 1.15 \times 2.45 \times (670 \times 9.5) \times 5 = 121947.035, \text{ тыс. руб.},$$

$$Y_2 = 1.36 \times 1.15 \times 2.45 \times (670 \times 0.006789) \times 1 = 17.43, \text{ тыс. руб.}$$

Прямое снижение эксплуатационных затрат в части экологических платежей составляет 121929,605 тыс. руб. в год.

### Заключение

Данные технические решения позволяют достичь требуемого качества воды для повторного использования. Главными достоинствами предлагаемого безреагентного метода на основе эффектов гидротермодинамической кавитации являются:

- 1) возможность очистки сточной воды ГЗУ со значительным колебанием количественного содержания загрязняющих веществ;
- 2) возможность использования предлагаемой технологии при модернизации существующего оборудования. Кавитационные реакторы легко встраиваются в существующие сооружения, например в аккумулирующие емкости, без значительного изменения их конструкции или трубопроводы;
- 3) снижение негативного воздействия на водные объекты при сбросе промышленных сточных вод, а следовательно, минимизация экологических рисков;

- 4) снижение эксплуатационных экономических затрат;
- 5) возможность полной автоматизации процесса кондиционирования осветленной воды ГЗУ.

Введение блока кавитационной обработки для интенсификации очистки осветленного стока гидрозолоудаления позволит сформировать замкнутый оборотный цикл водопользования и значительно повысить экологическую устойчивость региона присутствия предприятий теплоэнергетического комплекса, работающих на угольном топливе.

### Список литературы / References

[1] Ежегодный Отчет Федеральной службы Российской статистики, 2023 г. [Annual Report of the Federal Statistics Service of the Russian Federation, 2023 (In Rus.)].

[2] Информационный блок Евразийской экономической комиссии [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/43027> [дата обращения 02.04.2023]. [Information block of the Eurasian Economic Commission [Electronic resource]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/43027> [date of access 02.04.2023] (In Rus.)].

[3] РД 34.02.402–92 Методика расчета показателей качества осветленной воды систем гидрозолоудаления. [RD 34.02.402–92 Methodology for calculating the quality indicators of clarified water of hydraulic ash removal systems (In Rus.)].

[4] Алексеева Т.Е., Гольдина Т.М. Обеспечение надежной эксплуатации золоотвалов ТЭС путем организованного сброса из них избытков воды. *Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева*. 2000. Т. 237. 24–29. EDN IBWGEX. [Alekseeva T.E. Goldina T.M. Ensuring reliable operation of ash dumps of thermal power plants by organized discharge of excess water from them. *Bulletin of the All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B.E. Vedeneyev*. 2000. Vol. 237. 24–29 (In Rus.)].

[5] Фролов А.Н. Особенности расчетов водного баланса для золошлакоотвалов и оборотных систем гидрозолоудаления тепловых электростанций. *Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева*. 2009. Т. 254. 113–123 [Frolov A.N. Features of water balance calculations for ash dumps and circulating systems of hydraulic ash removal of thermal power plants. *Bulletin of the All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B.E. Vedeneyev*. 2009. Vol. 254. 113–123 (In Rus.)].

[6] Ларионова Н.А. Оценка влияния золоотвалов на загрязнение окружающей среды. Анализ, прогноз и управление природными рисками в современном мире (ГЕОРИСК- 2015): *Материалы 9-й Международной научно-практической конференции*. Том 1. М.: Российский университет дружбы народов, 2015. 297–302. EDN SMPQDH. [Larionova N.A. Assessment of the impact of ash dumps on environmental pollution. Analysis, forecast and management of natural risks in the modern world (GEORISK-2015): *Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference*, Vol. 1. Moscow: Peoples' Friendship University of Russia, 2015. 297–302 (In Rus.)].

[7] Дубровская О.Г., Евстигнеев В.В., Кулагин В.А. Кондиционирование сточных вод энергетических систем и комплексов. *Журнал СФУ. Техника и технологии*. 2011. 4(6). 629–641. EDN OWGCMN [Dubrovskaya O.G., Evstigneev V.V., Kulagin V.A. Conditioning of wastewater from energy systems and complexes. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2011. 4(6) 629–641. EDN OWGCMN (In Rus.)].

[8] Дубровская О.Г., Кулагин В.А., Лиминь Яо. Альтернативный метод кондиционирования промышленных стоков, содержащих тяжелые металлы, на основе кавитационной технологии. *Журнал СФУ. Техника и технологии*. 2020. 13(8). 991–1001 [Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A., Limin Yao Alternative method for conditioning industrial wastewater containing heavy metals based on cavitation technology. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2020. 13(8). 991–1001 (In Rus.)].

[9] А. с. № 1755906 А1 СССР, МПК В 01F 5/00, В 01F 7/04. Кавитационный смеситель: № 4760709: заявл. 07.08.1989: опубл. 23.08.1992 / В.А. Кулагин, Т.А. Кулагина, Е.П. Грищенко; заявитель Красноярский инженерно-строительный институт, красноярский политехнический институт. EDN NDEAOV. [Author's certificate No. 1755906 A1 USSR, IPC B 01F 5/00, B 01F 7/04. Cavitation mixer: No. 4760709: declared 08/07/1989: published 08/23/1992 / V. A. Kulagin, T. A. Kulagina, E. P. Grishchenko; applicant KRASNOYARSK ENGINEERING AND CIVIL ENGINEERING INSTITUTE, KRASNOYARSK POLYTECHNIC INSTITUTE. – EDN NDEAOV (In Rus.)].

[10] Кулагин В.А., Кулагина Т.А., Трошкин О.А. Гидродинамический кавитационный смеситель для биохимических исследований. *Гидродинамика больших скоростей: межвузовский сборник*; отв. редактор В.А. Кулагин. Красноярск: КПИ, 1992. 144–147. EDN VNYBAP [Kulagin V.A. Kulagina T.A., Troshkin O.A. Hydrodynamic cavitation mixer for biochemical research. *High-speed hydrodynamics: interuniversity collection*; editor V.A. Kulagin. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk Polytechnic Institute, 1992. 144–147. EDN VNYBAP (In Rus.)].

[11] Кулагин В.А., Кулагина Т.А., Шеленкова В.В. Феноменологическая модель гидродинамического кавитационного воздействия на водные системы. *Журнал СФУ. Техника и технологии*. 2019. 12(7). 818–829. DOI 10.17516/1999–494X-0182 [Kulagin V.A., Kulagina T.A., Shelenkova V.V. Phenomenological model of hydrodynamic cavitation impact on water systems. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2019. 12(7). 818–829. DOI 10.17516/1999–494X-0182 (In Rus.)].

[12] Матюшенко А.И., Шайхадинов А.А., Тугужаков Д.Б. и др. Повышение эффективности эксплуатации трубопроводов в условиях Сибири и Крайнего Севера. *Журнал СФУ. Техника и технологии*. 2015. 8(2). 224–231. EDN TLMKSJ [Matyushenko A.I., Shaikhadinov A.A., Tuguzhakov D.B. et al. Improving the efficiency of pipeline operation in Siberia and the Far North. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2015. 8(2). 224–231. EDN TLMKSJ (In Rus.)].

[13] Кулагина Т.А. *Разработка режимов сжигания обводненных топочных мазутов и водотопливных эмульсий*. Дисс. ... канд. техн. наук. Красноярск: КГТУ 2000. 178 с. [Kulagina T.A. *Development of combustion modes for watered fuel oils and water-fuel emulsions*. Diss. ... cand. of tech. sciences. Krasnoyarsk: KSTU, 2000. 178 p. (In Rus.)].

[14] Филимонова А.А. *Современные технологии ресурсосбережения для систем водопользования в энергетике*. Казань: КГЭУ, 2022. 152 с. ISBN 978–5–89873–603–3. [Filimonova A.A. *Modern resource-saving technologies for water management systems in energy*. Kazan: KSPEU, 2022. 152 p. ISBN 978–5–89873–603–3 (In Rus.)].

[15] Курилина Т.А., Дубровская О.Г., Кулагин В.А. и др. Перспективы использования модифицированного сорбционного материала для интенсификации очистки сточных вод гальванического производств. *Журнал СФУ. Техника и технологии*. 2019. 12(2). 182–191 [Kurilina T.A., Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A. et al. The prospects of utilizing the modified sorption material to

intensify purification of waste water from electroplating production. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2019. 12(2). 182–191 (In Rus.).

[16] Дубровская О. Г., Кулагин В. А. Безреагентная очистка промышленных сточных вод, содержащих тяжелые металлы на основе технологии гидротермодинамической кавитации. *Журнал СФУ. Техника и технологии.* 2019. 12(4). 460–467. [Dubrovskaya O. G., Kulagin V. A. Reagent-free treatment of industrial wastewater containing heavy metals based on hydrothermodynamic cavitation technology. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2019. 12(4). 460–467 (In Rus.).]

[17] Дубровская О. Г., Приймак Л. В., Андруняк И. В. *Ресурсосберегающие технологии обезвреживания и утилизации отходов предприятий теплоэнергетического комплекса Красноярского края*: монография Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. 164 с. [Dubrovskaya O. G. Priymak L. V., Andrunyak I. V. *Resource-saving technologies for the neutralization and utilization of waste from enterprises of the thermal power complex of the Krasnoyarsk Territory*: monograph. Krasnoyarsk: Sib. federal. university, 2014. 164 p. (In Rus.).]

[18] Дубровская О. Г., Кулагин В. А., Сапожникова Е. С. Современные компоновки технологических схем очистки сточных вод с использованием кавитационной технологии. *Журнал СФУ. Техника и технологии.* 2015. 8(2). 217–223 [Dubrovskaya O. G., Kulagin V. A., Sapozhnikova E. S. Modern layouts of technological schemes for wastewater treatment using cavitation technology. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2015. 8(2). 217–223 (In Rus.).]

[19] Дубровская О. Г., Кулагин В. А., Сапожникова Е. С., Ли Ф. Ч., Ли Ц., Чжэн Чжиин. Математическое моделирование кавитационных процессов при кондиционировании промышленных сточных вод. *Журнал СФУ. Техника и технологии.* 2015. 8(3). 369–376 [Dubrovskaya O. G., Kulagin V. A., Sapozhnikova E. S., Li F. Ch., Li C., Zheng Ch. Ying. Mathematical modeling of cavitation processes in the conditioning of industrial wastewater, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2015. 8(3). 369–376 (In Rus.).]

[20] Филатова Е. Г., Помазкина О. И., Дударев В. И., Шевелева Н. Н. Комплексная технология извлечения ионов никеля и меди из промышленных сточных вод. *Водоочистка.* 2012. № 12. 20–25 [Filatova E. G., Pomazkina O. I., Dudarev V. I., Sheveleva N. N. Integrated technology for extracting nickel and copper ions from industrial wastewater. *Water Treatment.* 2012. No. 12. 20–25 (In Rus.).]

EDN: CLUBKB

УДК 544.723.21

## Hydrogen Sulfide Surface Adsorption Study on Composite Materials from Waste Water of Thermal Power Plants

**Antonina A. Filimonova, Alena Y. Vlasova\*,  
Natalia D. Chichirova and Ruzina F. Kamaliev**  
*Kazan State Power Engineering University  
Kazan, Russian Federation*

Received 13.03.2025, received in revised form 04.04.2025, accepted 09.04.2025

**Abstract.** Environmental safety of industrial enterprises is one of the most important tasks, ensuring both high-quality preliminary preparation of gaseous fuel and purification of smoke emissions. Purification from sulfur compounds, such as hydrogen sulfide and mercaptans is most often carried out by the adsorption method using multicomponent materials. The authors have developed compositions of adsorption materials with the inclusion of solid waste from water treatment plants. Such compositions are distinguished by economic availability, increased resource conservation, and are also an ecological alternative to the disposal of industrial waste. As part of the work, the sulfur capacity of the developed compositions in laboratory conditions was determined, Langmuir and Freundlich adsorption isotherms were built for each composition, and the equilibrium constant. Based on the analysis of the data obtained, conclusions were made on the adsorption mechanisms for adsorbents.

**Keywords:** hydrogen sulfide, adsorbents, sludge from water treatment plants, gas purification, adsorption isotherms.

**Acknowledgements.** This work was supported by a grant provided by the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan for conducting fundamental and applied scientific research in scientific and educational institutions, enterprises, and organizations of the real sector of the economy of the Republic of Tatarstan (No. 15/2024-FIP from 24.12.2024. «Block for the preparation of gas emissions from petrochemical enterprises for energy use»).

Citation: Filimonova A. A., Vlasova A. Y., Chichirova N. D., Kamaliev R. F. Hydrogen Sulfide Surface Adsorption Study on Composite Materials from Waste Water of Thermal Power Plants. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(3), 369–379. EDN: CLUBKB



© 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: vlasovaay@mail.ru

# Изучение поверхностной адсорбции сероводорода на композитных материалах из отходов водоподготовительной установки ТЭС

А. А. Филимонова, А. Ю. Власова,  
Н. Д. Чичирова, Р. Ф. Камалиева

*Казанский государственный энергетический университет  
Российская Федерация, Казань*

**Аннотация.** Экологическая безопасность промышленных предприятий является одной из важнейших задач, обеспечивающих как качественную предварительную подготовку газообразного топлива, так и очистку дымовых выбросов. Очистка от сернистых соединений, таких как сероводород и меркаптаны, чаще всего осуществляется адсорбционным методом с применением многокомпонентных материалов. Авторами разработаны составы адсорбционных материалов с включением твердого отхода водоподготовки станции. Такие составы отличаются экономической доступностью, повышением ресурсосбережения, а также являются экологической альтернативой утилизации промышленных отходов. В рамках работы у разработанных составов в лабораторных условиях была определена сероёмкость, построены изотермы адсорбции Ленгмюра и Фрейндлиха для каждого состава, константа равновесия. По анализу полученных данных сделаны выводы по механизмам адсорбции для адсорбентов.

**Ключевые слова:** сероводород, адсорбенты, шлам водоподготовительных установок, очистка газа, изотермы адсорбции.

**Благодарности.** Данная работа выполнена при поддержке гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан для проведения фундаментальных и прикладных научных исследований в научных и образовательных учреждениях, на предприятиях и в организациях реального сектора экономики Республики Татарстан (№ 15/2024-ФИП от 24.12.2024). «Блок подготовки газовых выбросов нефтехимических предприятий к использованию в энергетике»).

Цитирование: Филимонова А. А. Изучение поверхностной адсорбции сероводорода на композитных материалах из отходов водоподготовительной установки ТЭС / А. А. Филимонова, А. Ю. Власова, Н. Д. Чичирова, Р. Ф. Камалиева // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(3). С. 369–379. EDN: CLUBKB

## Introduction

To ensure environmental safety and increase the operational period of an industrial enterprise, cleaning fuel gas from sulfur compounds is a critically important process. Sulfur present in fuel gas in the form of hydrogen sulfide ( $H_2S$ ), mercaptans (RSH) and other compounds, when burned, forms sulfur dioxide ( $SO_2$ ), polluting the atmosphere and accelerating the corrosion process. There are several methods for cleaning fuel gas from sulfur compounds, but adsorption methods are most often used due to economic feasibility. Adsorption methods offer an effective solution based on the use of solid sorbents for the selective extraction of sulfur-containing components.

The key advantage of adsorption is the ability to achieve high purification levels at relatively low temperatures and pressures. A variety of adsorbents, from activated carbon to zeolites and metal-organic frameworks, allows the process to be tailored to the specific gas composition and required purification parameters. Adsorption purification technologies include processes using a fixed bed of adsorbent, as well as cycles with variable pressure and temperature for sorbent regeneration. The choice of the optimal

scheme is determined by economic considerations, fuel gas characteristics, and the characteristics of the sorption materials.

Currently, industrial enterprises use gaseous petrochemical waste in addition to natural gas. Multi-component gaseous waste is formed during the catalytic and thermal processing of oil and is a valuable energy resource, and its use significantly increases the economic profit of the enterprise. In addition to resource conservation, the use of gaseous waste allows for energy autonomy, reducing the negative impact on the environment. But for the possibility of safe use of multi-component gaseous waste, preliminary adsorption purification is required, which will clean the gas from negative impurities (hydrogen sulfide, ethyl / methyl mercaptans) [1].

### Literature review

Today, there is a huge range of adsorption materials on the world market, which differ in composition and performance characteristics, and therefore have different efficiency. Materials of various actions are used as adsorbents: physical adsorption, chemisorption, combined. It is also worth noting that the adsorption materials presented on the market are very expensive. Therefore, materials made from industrial waste are of practical importance for enterprises, which significantly reduces their cost [2]. Therefore, the authors of this work have developed complex-component adsorption compositions aimed at desulfurization of gaseous fuel.

It is known that adsorbents based on iron compounds (salts, hydroxides, oxides) are used to purify gases from sulfur compounds. Thus, the enterprise “Poliex” has obtained a series of sorption materials based on iron oxides, intended for purifying gas emissions from hydrogen sulfide and its compounds. The authors present sorbent compositions consisting mainly of iron oxide, and oxides of aluminum, calcium, magnesium, potassium, sodium, silicon, manganese, and titanium are used as active additives [3].

The authors [4] propose the use of inexpensive and safe natural sorbents based on oxide and hydroxy-oxide compounds of metals. The authors refer to works where iron-manganese ores are used as sorbents of toxic sulfur-containing gases. According to literary sources [5–8], the ores have a good binding capacity for sulfur compounds in the gas flow. The sulfur adsorption of this sorbent is not high, only 25 ppm for hydrogen sulfide, so this material will require frequent regeneration. The advantages of this sorbent include simple regeneration, which is carried out by washing with water.

Foreign researchers considered the possibility of using sewage sludge after preliminary treatment. Preliminary treatment consisted of solid waste pyrolysis at a temperature of 400–1000 °C. Spectral analysis showed that these sorbents consist of 20–40 % carbon, up to 3–5 % iron, 4–5 % calcium in the form of oxides, as well as oxides of other metals Mg, Cu, Zn, Cr, Al in a smaller percentage content. Preliminary thermal treatment of waste allows obtaining a porous structure with a fairly large specific surface [9–11].

The authors [12] proposed an adsorbent for cleaning hydrogen-containing gas from sulfur compounds based on heavy metal oxides (cobalt, nickel, molybdenum) applied to an inorganic carrier. To increase the absorption efficiency, the adsorbent is pre-saturated with 3–10 % moisture. The sorbent is regenerated at a temperature of 180–350 °C.

The efficiency of adsorption processes directly depends on the component composition of the adsorbent and adsorbate, as well as on the process conditions: gas pressure (or concentration of the dissolved substance) and temperature. Based on the obtained data, the dependence of the adsorbed amount of gas on pressure is constructed – the adsorption isotherm. During the adsorption process, the adsorbent

surface is successively coated with particles of the adsorbed substance. First, the areas with the highest activity are filled, and then the coating spreads to the entire available area. After complete saturation of the first layer, the molecules are able to form subsequent layers, forming a multilayer structure. In this regard, two types of adsorption are distinguished: monomolecular, in which only one layer is formed, and polymolecular, characterized by the formation of several layers of the adsorbed substance.

There are different types of isotherms, including Langmuir and Freundlich isotherms, each of which describes different mechanisms of adsorption and the interaction of the adsorbate with the adsorbent surface. The type of experimental adsorption isotherms depends on many factors, so D. Langmuir introduced a number of simplifications in order to derive the adsorption isotherm equation [13]. Analysis of isotherms allows us to determine adsorption parameters, such as the maximum adsorption capacity and the adsorption equilibrium constant, which is necessary for optimizing adsorption processes. It also follows that a comparison of experimentally obtained data with the shape of the isotherm allows us to make an assumption about the adsorption mechanism and the pore size in the material under study [14].

There are five key types of adsorption isotherms to describe the process of absorption of gaseous medium by a solid material (Fig. 1). The first type is usually observed in microporous adsorbents. The initial convex segments of the isotherms of the second and fourth types are due to the presence of micropores.

The subsequent form of isotherms is determined by multilayer adsorption and capillary condensation. Concave sections observed in isotherms of the third and fifth types are characteristic of «adsorbent–adsorbate» systems, where the force of interaction between the adsorbate molecules and the adsorbent is inferior to the force of intermolecular interaction between the adsorbate molecules.

There are various mathematical models of adsorption, such as monomolecular adsorption, multilayer adsorption and capillary condensation. Each of them adequately describes the experimental data obtained under specific conditions [15].

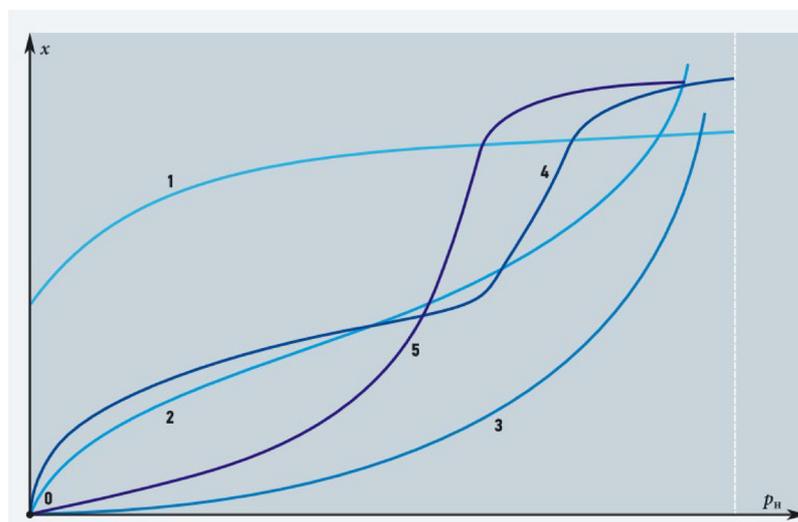


Fig. 1. Main types of adsorption isotherms (type 1 – microporous adsorbents; type 2 – polymolecular adsorption on non-porous or macroporous adsorbents; type 3 – non-porous sorbents with low energy of «adsorbent–adsorbate» interaction; types 4 and 5 are similar to types 2 and 3, but for porous adsorbents)

Each adsorbent-adsorbate system has its own isotherm. If the theoretical equation of the adsorption isotherm converges within the permissible error with the results of experimental studies, then it is possible to calculate unknown adsorption values under different conditions ( $p$  and  $T$ ) and determine various geometric parameters of solids.

In this work, the authors developed and presented adsorption compositions based on solid waste from water treatment plant of TPP. Sludge as one of the components of sorbents contains mainly metal oxides, active with respect to hydrogen sulfide. Composite materials are complex adsorbents in which the percentage of components was selected taking into account the chemical and physical properties of the materials. The main task of the authors was to develop an effective adsorbent of sulfur compounds from an accessible and free waste – sludge from a thermal power plant. The efficiency of adsorption compositions in binding sulfur compounds was determined on a laboratory setup [16].

### Methods and materials

The efficiency of the developed adsorbents was tested in laboratory conditions by passing hydrogen sulfide through an adsorption column. Hydrogen sulfide was generated by a chemical reaction between sodium sulfide and hydrochloric acid. The gas mixture was directed by an air flow into an adsorber with a sorption material. At the outlet of the adsorber, the purified gases were directed into a flask with an absorbing solution to capture residual sulfur-containing components. The concentration of these compounds in the absorbing solution was determined according to GOST 22387.2–2021 «Natural gas». Methods for determination of hydrogen sulfide and mercaptan sulfur”. When the concentration of sulfur compounds in the absorbing solution was more than 100 mcg, the experiment was stopped, since the sorption material needed to be regenerated. The concentration of sulfur compounds in the absorbing solution was determined using a spectrophotometer at a wavelength of 665 nm. The sulfur capacity of the studied compositions was calculated as the ratio of the mass of sulfur compounds retained by the adsorbent to the mass of the adsorbent. The results are presented in Table 1.

Table 1. Compositions of the developed adsorbents and their sulfur capacity

No.	Sorbent composition	Sulfur adsorption capacity mg/g (%)
1	Calcined sludge 50 %, NaOH 8.5 %, red clay 41.5 %	312.1 (31.2)
2	Calcined sludge 70 %, NaOH 8.5 %, ZnO 21.5 %	387.6 (38.7)
3	Non-calcined sludge 10 %, NaOH 8.5 %, ZnO 50 %, MnO 10 %, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 21.5 %	388.96 (38.89)
4	Calcined sludge 50 %, non-calcined sludge 10 %, NaOH 8.5 %, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 31.5 %	413.3 (41.3)
5	Calcined sludge 31.5 %, non-calcined sludge 10 %, NaOH 17 %, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 41.5 %	452 (45.2)
6	Non-calcined sludge 10 %, NaOH 15.3 %, ZnO 74.7 %	529.6 (52.96)
7	Calcined sludge 40 %, non-calcined sludge 10 %, NaOH 10 %, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 10 %, MnO 10 %, ZnO 20 %	600 (60)
8	Calcined sludge 50 %, NaOH 8.5 %, ZnO 41.5 %	686 (68)
9	Calcined sludge 50 %, NaOH 8.5 %, ZnO 31.5 %, CuO 10 %	967.3 (96.7)
10	Calcined sludge 50 %, NaOH 8.5 %, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 41.5 %	980 (98)

## Results

Langmuir and Freundlich adsorption isotherms were constructed based on the obtained experimental data. The type of the obtained isotherm forms confirms the possibility of using them to describe the process of sulfur compounds adsorption on the developed compositions. The adsorption equilibrium constant  $K$  was determined for each composition individually as the ratio of the equilibrium adsorption value to the equilibrium concentration of sulfur compounds in the solution. The constants were determined graphically, using the linearization of the Langmuir (1) and Freundlich (2) isotherms:

$$\frac{C}{A} = \frac{C}{A_{max}} + \frac{1}{K_L A_{max}}. \quad (1)$$

$$\ln A = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C, \quad (2)$$

where –  $C$  is the residual concentration, mg/l;  $A$  is the sulfur capacity, mg/g;  $A_{max}$  is the maximum sulfur capacity, mg/g.

The constants for the Langmuir and Freundlich isotherms are presented in Table 2.

Table 2. Constants and correlation coefficients for Langmuir and Freundlich isotherms

No.	Langmuir isotherm			Freundlich isotherm		
	$A_{max}$ , mg/g	$K_L$ , l/mg	$r$	$n$	$K_F$	$r$
1	9.0	0.01400	0.98479	1.4	0.1650	0.85565
2	12.4	0.00460	0.99694	2.0	0.4070	0.96807
3	14.0	0.00420	0.95698	1.0	0.0301	0.91712
4	32.0	0.00034	0.94443	0.9	0.0041	0.89051
5	9.0	0.01100	0.99371	2.0	0.3680	0.91522
6	2.5	0.00093	0.99543	1.2	0.0041	0.98095
7	20.0	0.00140	0.98609	1.8	0.2470	0.96628
8	2.4	0.00690	0.98822	1.6	0.0500	0.89787
9	20.0	0.00670	0.97483	1.8	0.4490	0.89851
10	39.8	0.00500	0.98108	1.5	0.4070	0.88601

Table 3 shows the appearance of the developed sorption materials, as well as the calculated curves of the Langmuir isotherm, constructed using the equation and the Freundlich isotherm. Considering that the correlation coefficient from Table 2 for the Langmuir and Freundlich isotherms lie in the confidence interval, the experimental data obtained empirically agree with the theoretical data. A correlation coefficient close to one indicates a complex nature of sorption, physical and chemical, this can be explained by the heterogeneity of the location of the adsorption centers. The greatest proximity of the correlation coefficient is in the Langmuir isotherm, therefore it describes the sorption process most correctly.

Based on the obtained results, it follows that all the studied sorbents have the first type of sorption isotherm and are characterized by a monomolecular adsorption mechanism. This type of isotherm

Table 3. Appearance of sorbents. Langmuir and Freundlich isotherms, experimental curve

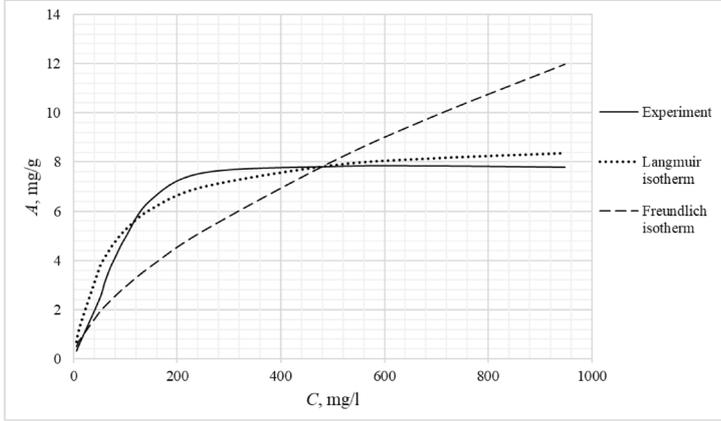
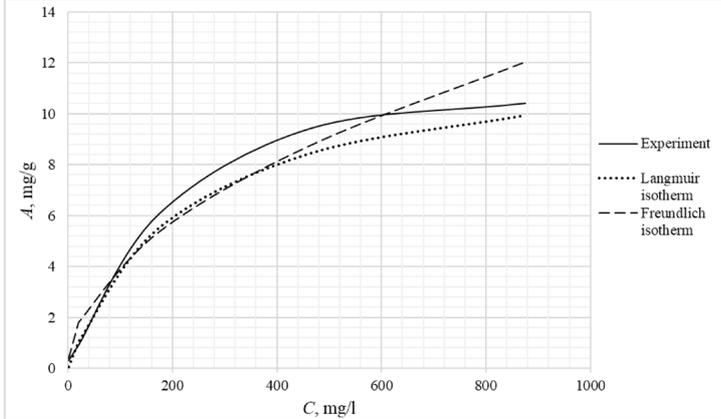
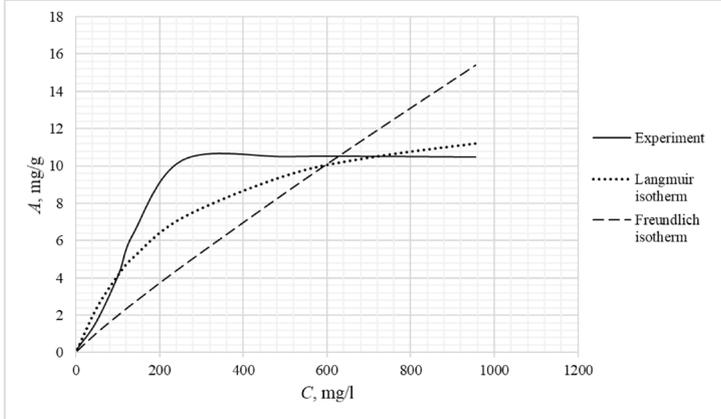
No.	Appearance	Adsorption isotherm
1		
2		
3		

Table 3 Continued

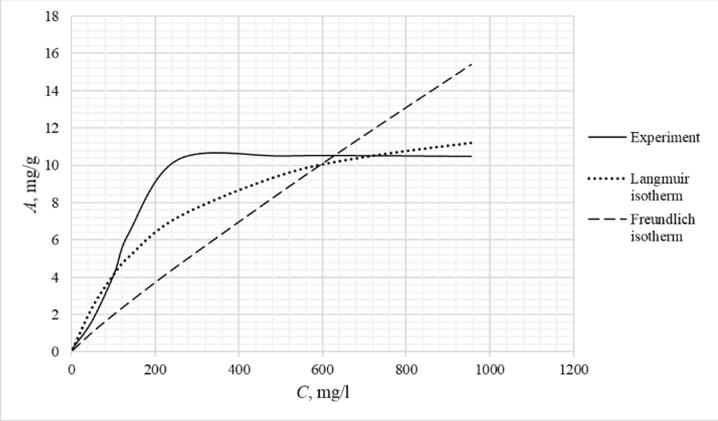
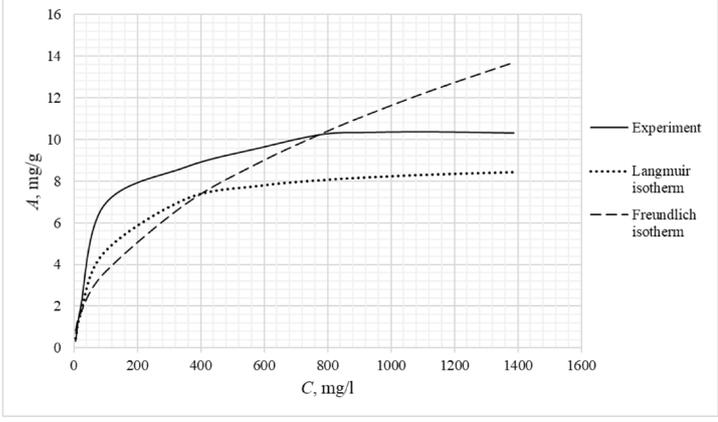
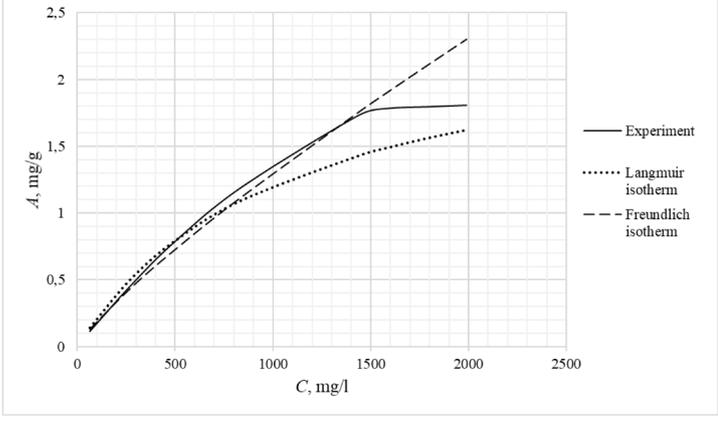
No.	Appearance	Adsorption isotherm
4		
5		
6		

Table 3 Continued

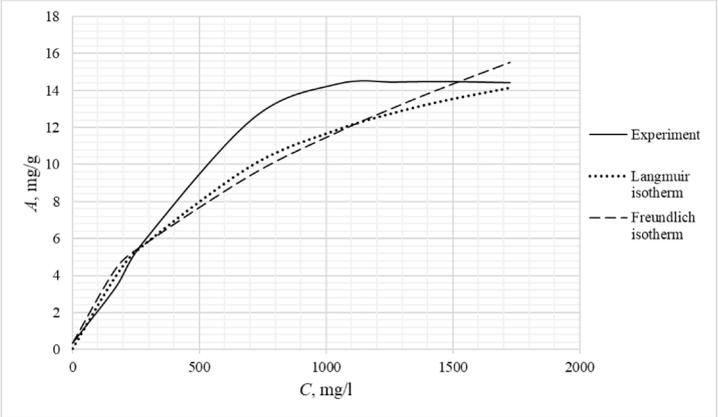
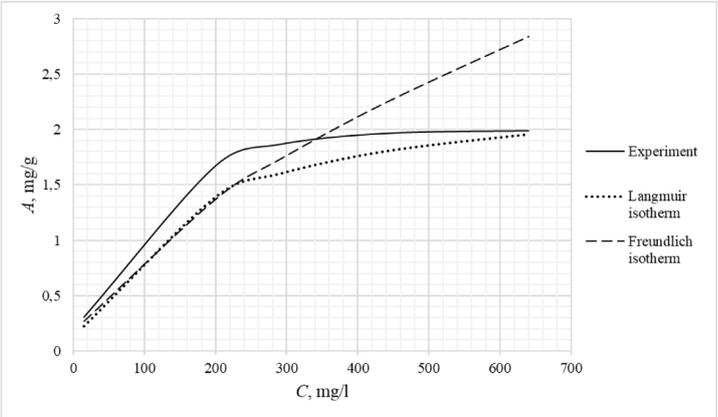
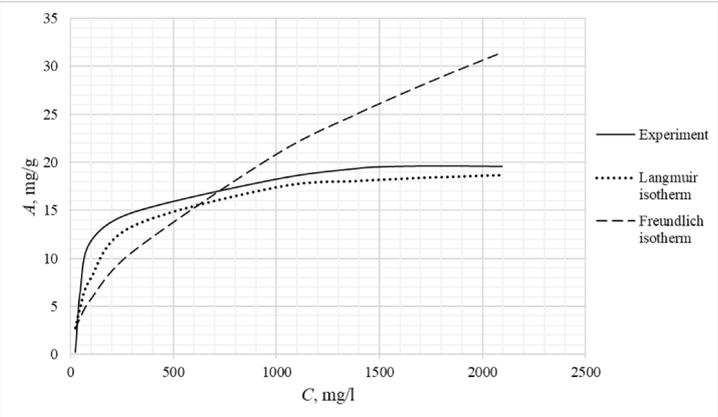
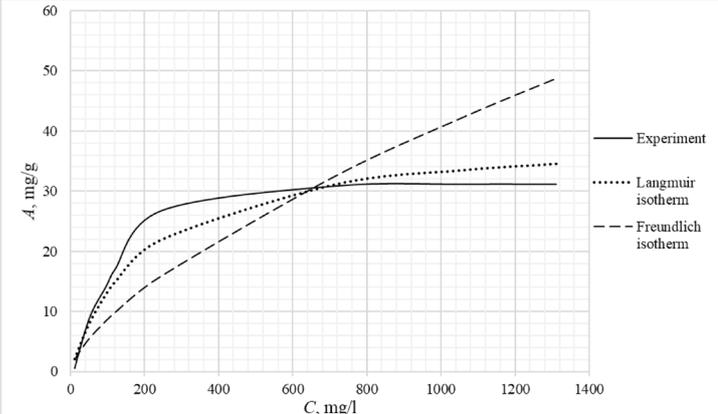
No.	Appearance	Adsorption isotherm
7		
8		
9		

Table 3 Continued

No.	Appearance	Adsorption isotherm
10		

assumes the formation of one layer of adsorbate on the adsorbent surface. At the beginning of the process, a sharp increase in adsorption is observed, due to the high availability of active centers, and therefore a high degree of interaction. The curved section of the isotherm indicates the saturation of the monomolecular layer.

As the surface is filled, the rate of adsorption decreases until a state of saturation is reached, when all available sites are occupied. The first type of isotherm has a convex shape, indicating a strong interaction between the adsorbate and the adsorbent. This type of isotherm is often found in systems where the adsorbate has a high affinity for the adsorbent surface. The first type of isotherm is typical for adsorbents with a limited porous structure, where the formation of multilayer films is impossible.

### Conclusion

The paper presents the results of the study of the adsorbents developed compositions for hydrogen sulfide. The uniqueness of these adsorbents was that their composition includes waste from the water treatment plant of the TPP up to 50 %, which significantly reduces the cost of the sorbent and makes it as accessible as possible. In addition to the sludge from the thermal power plant, reagents such as sodium alkali, zinc oxide, iron oxide, manganese oxide and copper oxide were used as additives providing chemical binding of hydrogen sulfide.

These compositions were analyzed and the main parameters of adsorption equilibrium were established: adsorption capacity of the sorbent, equilibrium constant, correlation coefficient between experimental data and Langmuir and Freundlich models. Based on the obtained data, the applicability of Langmuir and Freundlich isotherm models was estimated. Statistical processing of the experimental data results allowed correctly describe the sorption process.

The results of modeling show that the developed adsorbent samples have a microporous structure. Also, the predominant adsorption mechanism is chemisorption due to the interaction of hydrogen sulfide adsorbate with metal oxides (alkaline, alkaline earth), which are part of the developed adsorbents.

## References

- [1] Iliev I., Filimonova A., Vlasova A., Kamaliev R., Beloiev H. Desulfurization Technology for Industrial Fuel Gases Using Natural Adsorption Materials, *Eng. Proc.*, 2024, 70, 42.
- [2] Iliev I., Filimonova A., Chichirov A., Vlasova A., Kamaliev R., Beloiev I. Natural and Waste Materials for Desulfurization of Gaseous Fuels and Petroleum Products, *Fuels*, 2025, 6, 13.
- [3] Patrusheva T.A., Chechulina N.S., Glushankova I.S. Investigation of the possibility of using «Polyex» series sorbents to purify biogas from municipal solid waste landfills from hydrogen sulfide, *Chemistry. Ecology. Urbanistics*, 2019, 1, 182–186 (In Rus.).
- [4] Shikina N.V., Khairulin S.R., Kuznetsov V.V., Rudina N.A., Ismagilov Z.R. Development and research of adsorbents based on ore materials for purification of flue gases of thermal power plants from sulfur dioxide, *Chemistry for Sustainable Development*, 2015, 23(2), 199–208 (In Rus.).
- [5] Jang H.T., Kim S.B., Doh D.S. The removal of hydrogen sulfide with manganic sorbent in a high-temperature fluidized-bed reactor, *Korean J. Chem. Eng.*, 2003, 20(1), 116–120.
- [6] Yoon Y.I., Kim M.W., Yoon Y.S., Kim S.H. A kinetic study on medium temperature desulfurization using a natural manganese ore, *Chem. Eng. Sci.*, 2003, 58(10) 2079–2087.
- [7] Jeong S.K., Park T.S., Hong S.C. Simultaneous SO<sub>x</sub>/NO<sub>x</sub> removal in a fluidized bed reactor using natural manganese ore, *J. Chem. Techn. & Biotechn.*, 2001, 76(10) 1080–1084.
- [8] Nitta M. Characteristics of manganese nodules as adsorbents and catalysts, a review, *Appl. Catal.*, 1984, 9, 151–176.
- [9] Ansari A., Bagreev A., Bandosz T.J. Effect of adsorbent composition on H<sub>2</sub>S removal on sewage sludge-based materials enriched with carbonaceous phase, *Carbon*, 2005, 43(5), 1039–1048.
- [10] Bandosz T.J., Block K.A. Removal of Hydrogen Sulfide on Composite Sewage Sludge-Industrial Sludge-Based Adsorbents, *Ind. Chem. Eng. Res.*, 2006, 45(10) 3666–3672.
- [11] Bagreev A., Bandosz T.J. H<sub>2</sub>S Adsorption/Oxidation on Materials Obtained Using Sulfuric Acid Activation of Sewage Sludge-Derived Fertilizer, *J. Colloid Interface Sci.*, 2002, 252(1), 188–194.
- [12] Rabinovich G.L., Shapiro R.N., Shipikin V.V., Yakubenko V.M., Chesnovitsky K.G., Revtovich V.I. Method of purification of hydrogen-containing reforming gas from hydrogen sulfide. USSR Patent No. 1820623. 2000 (In Rus.).
- [13] Almyasheva O.V., Gusarov V.V., Lebedev O.A. *Surface phenomena*, St. Petersburg: Publishing House of SPbSETU «LETI», 2004. 28 p. (in Russian).
- [14] Gavrilova N.N., Nazarov V.V. *Analysis of the porous structure of materials based on adsorption data*, Moscow: Mendeleev Russian Technical University, 2022. 151 p. (In Rus.).
- [15] Mosin O.V. On the process of adsorption on solid adsorbents, *Plumbing, Heating, Air conditioning*, 9(153), 38–42 (In Rus.).
- [16] Filimonova A.A., Vlasova A. Yu., Kamaliev R.F. Experimental studies of hydrogen sulfide adsorbents based on sludge from a TPP water treatment plant, *Problems of Regional Energy*, 2025, 1(65), 135–145 (In Rus.).

EDN: TRQXDE

УДК 669.018.44

## **Structure and Phase Composition of Industrial Alloy 47CrNiMo After Aging**

**Elena V. Korotkova\***,  
**Fedor M. Noskov and Liudmila I. Kveglis**  
*Siberian Federal University*  
*Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 19.01.2025, received in revised form 26.01.2025, accepted 09.04.2025

**Abstract.** The development of the modern nuclear industry leads to the need to create materials that operate at high temperatures, high mechanical loads, and aggressive contact environments. Alloy 47 CrNiMo is recommended for use in nuclear reactors, as it has high resistance to plastic deformation and relaxation resistance under conditions of static and cyclic loading, low elastic hysteresis, high fatigue strength and high corrosion resistance.

The article presents the results of a study of changes in the mechanical properties, phase composition and structures of the industrial alloy 47CrNiMo after aging using the following methods: X-ray diffraction analysis, microhardness measurements, tension in a tensile testing machine.

The dependence of microhardness on the aging time interval has been established. The maximum high microhardness was recorded on the samples after aging. The dependences of the ultimate strength and relative elongation of the studied samples on the aging time were revealed. In this work, X-ray diffraction patterns of the 47 CrNiMo alloy were analyzed and a cluster model of grain boundaries was proposed.

**Keywords:** nuclear industry, high temperatures, alloy 47CrNiMo, aging, deformation.

**Acknowledgements.** The authors of the article thank Professor of the Amanzholov Higher School of Economics, Yerbolatuly Dosym, for assistance in conducting the experiments.

Citation: Korotkova E. V., Noskov F. M., Kveglis L. I. Structure and Phase Composition of Industrial Alloy 47CrNiMo After Aging. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(3), 380–391. EDN: TRQXDE



© 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: Lena1992-11@mail.ru

## Структура и фазовый состав в промышленном сплаве 47ХНМ после старения

Е. В. Короткова, Ф. М. Носков, Л. И. Квеглис  
*Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск*

**Аннотация.** Развитие современной ядерной промышленности приводит к необходимости создания материалов, работающих при высоких температурах, больших механических нагрузках, агрессивных средах. Сплав 47ХНМ рекомендован для использования в ядерных реакторах, так как обладает высоким сопротивлением пластическим деформациям и релаксационной стойкостью в условиях статического и циклического нагружений, малым упругим гистерезисом, высокой усталостной прочностью и высокой коррозионной стойкостью, термостойкостью.

В статье представлены результаты исследования изменений физико-механических свойств, фазового состава и структур промышленного сплава 47ХНМ после старения методами рентгеноструктурного анализа, измерений микротвердости, а также методами дифракционной электронной микроскопии.

Установлена зависимость микротвердости от интервала времени проведения старения. В работе проанализированы рентгенограммы сплава 47ХНМ, где обнаружены фазы со структурой Франка-Каспера. Предложена кластерная модель межзеренных границ.

**Ключевые слова:** ядерная промышленность, высокие температуры, сплав 47ХНМ, старение, деформация.

**Благодарности.** Авторы статьи благодарят профессора ВКУ им. Аманжолова Ерболатулы Досыма за помощь в проведении экспериментов.

Цитирование: Короткова Е. В. Структура и фазовый состав в промышленном сплаве 47ХНМ после старения / Е. В. Короткова, Ф. М. Носков, Л. И. Квеглис // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(3). С. 380–391. EDN: TRQXDE

### Введение

Развитие современной ядерной промышленности [1, 2] приводит к необходимости создания материалов, работающих при высоких температурах, больших механических нагрузках, агрессивных контактных средах. В настоящее время ведутся интенсивные исследования [3, 4] материалов для работы в ядерных реакторах. Сплав 47ХНМ обладает высоким сопротивлением пластическим деформациям и релаксационной стойкостью в условиях статического и циклического нагружений, малым упругим гистерезисом и высокой усталостной прочностью. Основным преимуществом сплава 47ХНМ является его высокая коррозионная стойкость в агрессивных средах [5]. Большой научный и практический интерес представляет изучение структуры и свойств дисперсно-твердеющих сплавов, в которых процесс выделения упорядоченных фаз в значительной мере зависит от их структурного состояния. Структурная неоднородность после старения обусловлена неравномерным протеканием процессов прерывистого выделения некогерентной Р-фазы с тетраэдрически плотно упакованной структурой (Ni–Mo–Cr) [6]. При увеличении температуры старения до 1000 градусов происходит смена механизма распада [7]. В этом случае избыточная фаза с тетраэдрической плотно упакованной структурой Франка-Каспера выделяется по непрерывному механизму.

Цель работы: выявить условия изменений структуры и механических свойств в дисперсионно-твердеющем сплаве 47ХНМ в зависимости от времени старения.

Задачи работы:

1. Провести термообработку сплава при различных температурах и временных интервалах.
2. Сравнить структуру и механические свойства сплава 47ХНМ, подвергнутого термической обработке.
3. Выявить условия появления сверхпластичности в сплаве 47ХНМ.

### Методы исследования

Образцы сплава 47ХНМ имели стандартный химический состав: 47 %-Cr, 5 %-Mo, 48 %-Ni были прокатаны на 50 % и затем подвергнуты отжигу в муфельной печи при 700 °С в течение 1, 2, 5, 10 ч. Вторая партия после прокатки на 50 % была подвергнута высокотемпературной деформации растяжением при температуре 920, 940, 950, 960, 980 °С. Третья партия образцов была закалена от 1250 °С (2 мин) и подвергнута старению при 700 °С в течение 1, 3, 5 и 10 ч. Приготовленные таким образом образцы исследовали следующими методами: рентгеноструктурного фазового анализа на дифрактометре X-PERT-PRO, измерения микротвердости на установке МЕТОЛАБ-502, растяжения в разрывной машине WDW-5E.

### Результаты и обсуждение

Результаты исследования микротвердости сплава после отжига представлены в табл. 1.

Обнаружено, что микротвердость была максимально высокой после 5 ч отжига, а после 10 ч отжига уменьшилась почти вдвое.

В табл. 2 представлены результаты растяжения образцов на разрывной машине. Измерены следующие параметры растянутых образцов:

$\sigma_b = \frac{P_{max}}{f_0}$  – предел прочности,  $P_{max}$  – максимальная нагрузка при растяжении,  $f_0 = A_0 * B_0$  –

площадь поперечного сечения образца,  $\Delta l = \frac{l_{последнее} - l_0}{l_0} * 100 \%$  – относительное удлинение.

Из табл. 2 видны зависимости предела прочности и относительного удлинения исследуемых образцов в зависимости от времени отжига. Видно, что относительное удлинение увеличилось в 4 раза после отжига в течение 10 ч [8].

Таблица 1. Результаты исследования микротвердости сплава 47ХНМ после отжига

Table 1. Results of the study of the microhardness of the 47CrNiMo alloy after annealing

Время отжига, S	Твердость, МПа
1 час	4153
2 час	3854
5 час	4204
10 час	2562

Таблица 2. Результаты, полученные из диаграмм растяжения образцов, подвергнутых отжигу в течение 1, 2, 5, 10 ч

Table 2. The results obtained from the stretching diagrams of the samples subjected to annealing for 1, 2, 5, 10 hours

	1час	2час	5час	10час
$\sigma_b$	595МПа	675МПа	800МПа	675МПа
$\Delta$	4,2мм	8,3мм	12,5мм	17мм

На рис. 1 приведены данные рентгеноструктурного анализа образцов сплава 47ХНМ, подвергнутых отжигу в течение 1, 2, 5, 10 ч. В результате анализа рентгенограмм сплава 47ХНМ были получены следующие результаты. Твердый раствор на основе никеля содержит атомы хрома и молибдена, которые замещают атомы никеля в гранцентрированной кубической решетке. На этих дифрактограммах видны линии  $\alpha$ -фазы Cr (рефлекс (200)). Кроме этого, согласно [9] наблюдаются линии атомно упорядоченной Р-фазы Cr-Mo-Ni, самый яркий рефлекс которой соответствует углу 29,5 градуса. С увеличением времени отжига интенсивность этого рефлекса растет. Кроме того, наблюдается ярко выраженное диффузное гало в зоне угла 20 градусов. Такое гало характеризует развитый ближний порядок в расположении атомов хрома, никеля и молибдена. Такое гало наблюдается на рентгенограммах, полученных на всех образцах. Однако наиболее слабым это гало видно на дифрактограмме образца, отожженного в течение 10 ч, что свидетельствует об изменении ближнего порядка в расположении атомов никеля, хрома и молибдена. После этого отжига атомно упорядоченная Р-фаза Cr-Mo-Ni выделяется как вторая фаза, которая представляет собой кластерную структуру, где атомы хрома, никеля и молибдена занимают особые узлы.

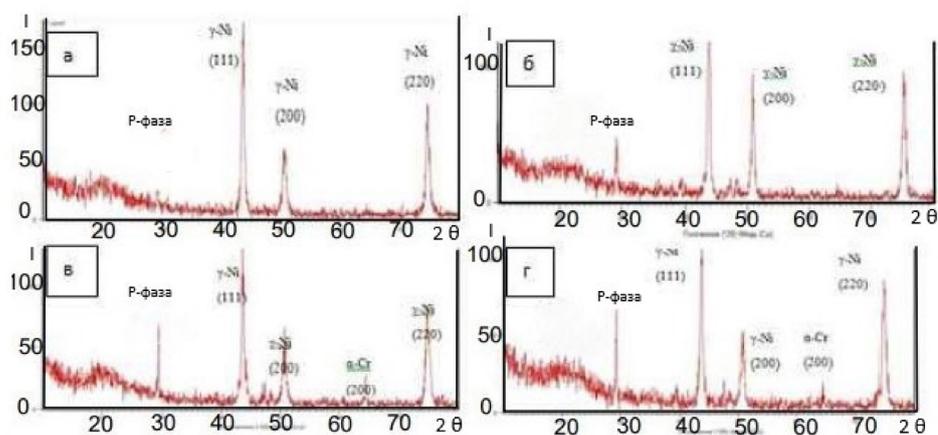


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы сплава 47ХНМ после различного времени дисперсионного отжига: а – 1 ч, б – 2 ч, в – 5 ч, г – 10 ч

Fig. 1. X-ray diffraction patterns of alloy 47XNM after different times of dispersion annealing: а – 1 hour, б – 2 hours, в – 5 hours, г – 10 hours

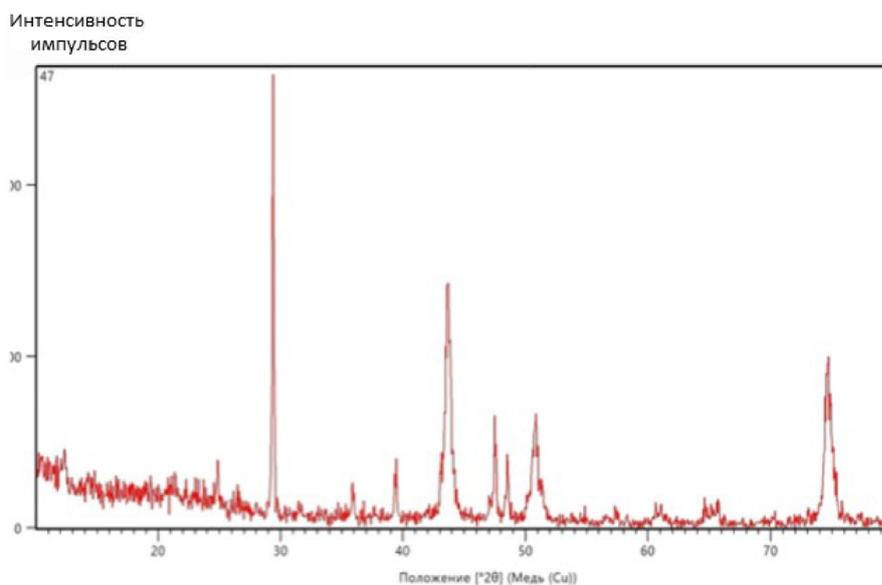


Рис. 2. Рентгеновская дифрактограмма сплава 47ХНМ после старения в течение 50 лет при комнатной температуре

Fig. 2. X-ray diffraction pattern of alloy 47XNM after aging for 50 years at room temperature

Данные рентгеноструктурного анализа приведены на рис. 2, где обнаружен яркий рефлекс Р-фазы Cr-Mo-Ni, имеющей структуру октаэдров, прикрепленных к тетраэдрически плотно упакованным тетраэдрам, расположенным по спирали вдоль горизонтальной оси.

Расшифровка показывает, что в структуре присутствуют фазы на основе кристаллической решетки никеля (ГЦК) с параметром 3,586 Å, а также  $\alpha$ -хрома (ОЦК) с параметром 2,837 Å. Параметры экспериментально обнаруженных равновесных фаз отличаются от табличных параметров (ГЦК-Ni – параметр 3,524 Å, ОЦК-Cr – параметр 2,884 Å), что может быть объяснено диффузией хрома в никель и, соответственно, никеля в хром. Кроме того, обнаруженные твердые растворы являются сверхструктурными (это касается и метастабильной фазы хрома с примитивной решеткой), так как для них выявлены сверхструктурные пики (показаны в таблице звездочкой).

Выявлено наличие так называемой Р-фазы ( $\text{Cr}_{9.54}\text{Mo}_{25.24}\text{Ni}_{21.22}$ ), являющейся продуктом реакции всех трех легирующих компонентов сплава. Кроме того, в структуре присутствует метастабильная фаза хрома на основе примитивной кубической решетки (Pm3n) с параметром 4,570 Å.

На картине рентгеновской дифракции наблюдается также система рефлексов, отвечающая еще одной примитивной кубической решетке с параметром 4,128 Å. Ее возникновение объясняется особенностями взаимной когерентной связи двух равновесных фаз – ГЦК-никеля и ОЦК-хрома. Кристаллические решетки этих двух фаз могут быть связаны через атомные конфигурации с тетраэдрически плотноупакованными атомами. Примером такой тетраэдрической упаковки являются тетраэдрические спирали, или икосаэдры (или их комбинации).

Таблица 3. Результаты, полученные при расшифровке образца после 50 лет старения

Table 3. Results obtained from decoding the sample after 50 years of aging

Интенсивность, %	Угол 2 $\theta$	Межплоскостное	Ni, ASTM № 4–850 Cubic Fm3m	Cr, ASTM № 6–694 Cubic Im3m	Cr, ASTM № 19–323 Cubic Pm3n	ПК, d=4.128Å	Cr <sup>9.54</sup> Mo <sup>25.24</sup> Ni <sup>21.22</sup> Р-фаза
15	11.0	8.024					101 (–0,02)
16	12.4	7.130	½00 (+0,03)*				
11	19.5	4.547			100 (0,00)*		002 (–0,01)
12	20.9	4.245					400 (0,00)
12	21.5	4.128	½½½ (0,00)*	½½0 (0,00)*		100 (0,00)	
10	22.3	3.982					202 (+0,02)
15	24.8	3.586	100 (–0,01)*				
9	26.4	3.372				1½½ (0,00)*	<b>500 (0,00)</b>
7	29.3	3.045					212 (+0,01)
100	29,6	3.014					411 (–0,02)
3	30.6	2.919				110 (0,00)	
5	31.5	2.837		100 (+0,03)*			
11	35.9	2.498	110 (+0,03)*		3/2 1 ½ (0,00)*		
5	37.7	2.383				111 (0,00)	<b>602 (–0,01)</b>
16	39.3	2.290			200 (+0,01)		004 (–0,03)
54	44.0	2.055	111 (–0,02)	110 (–0,01)	210 (0,00)	200 (0,00)	<b>420 (+0,01)</b>
21	47.5	1.912					802 (+0,01)
16	48.6	1.871			211 (0,00)		613 (+0,02)
3	49.3	1.846				210 (0,00)	
21	51.0	1.789	200 (–0,03)				
5	54.9	1.670				211 (+0,01)	
5	57.1	1.611			220 (0,00)		
3	58.1	1.586					415 (–0,01)
5	60.8	1.522					424 (0,00)
5	61.2	1.513					331 (–0,01)
7	64.8	1.437		200 (0,00)	310 (0,00)	220 (+0,01)	
6	65.9	1.416					10 13 (0,00)
4	73.1	1.293			222 (+0,03)	310 (+0,01)	
36	74.8	1.268	220 (–0,03)		320 (0,00)		
5	75.9	1.252			321 (+0,03)	311(+0,01)	

Для удобства рассуждений предположим, что тетраэдрические атомные конфигурации близки по своему расположению к икосаэдру.

На рис. 3б продемонстрировано, как икосаэдр вписывается в куб. Для этого ребра типа 1–2, 3–4 или 7–8 располагаются в гранях куба. В икосаэдре все ребра попарно параллельны, каждая пара образует золотой прямоугольник, т.е. прямоугольник с отношением ребер, равным 1,618 [10]. Золотой прямоугольник выделен на рис. 4в пунктиром как прямоугольник 3–4–5–6.

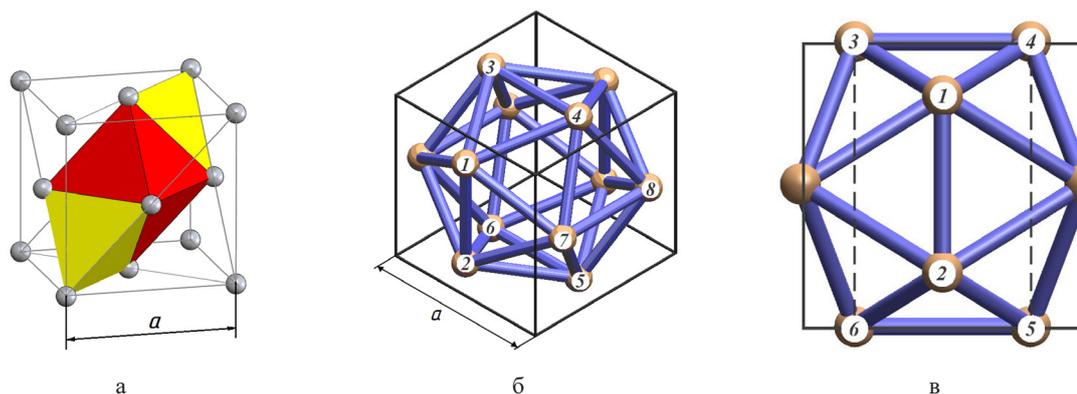


Рис. 3. Кластерное представление кристаллических структур: а – ромбоэдрический кластерный агрегат ГЦК-решетки; б – схема, демонстрирующая связь икосаэдра с примитивной кубической решеткой; в – золотой прямоугольник 3–4–5–6 в икосаэдре

Fig. 3. Cluster representation of crystal structures: а – rhombohedral cluster aggregate of fcc lattice; б – diagram demonstrating the connection of the icosahedron with a primitive cubic lattice; в – golden rectangle 3–4–5–6 in an icosahedron

Предположим, что в примитивный куб с параметром  $4,128 \text{ \AA}$  вписан икосаэдр. Рассчитаем длину его ребер (и, соответственно, ребер 20 тетраэдров, из которых он состоит), для этого  $4,128 \text{ \AA}$  разделим на отношение золотого сечения  $1,618$ . Результат равен  $2,55 \text{ \AA}$ . Как показано на рис. 6а, структура ГЦК может быть представлена как комбинация октаэдра и тетраэдра, причем ребра у указанных фигур одинаковы. Для никеля с параметром  $a = 3,586 \text{ \AA}$  ребро тетраэдра ( $d_{110}$  ГЦК решетки) будет составлять  $2,54 \text{ \AA}$  (для этого параметр  $3,586 \text{ \AA}$  делим на корень из двух). То есть размеры тетраэдров, складывающих икосаэдр, совпадают с размерами тетраэдров, образующих структуру ГЦК-никеля. Теперь становится понятна причина выявления в эксперименте рефлексов, отвечающих примитивному кубу с параметром  $4,128 \text{ \AA}$  (см. табл. 3). Очевидно, что «никелевые» тетраэдры на границе фазы сложились не в виде ГЦК-решетки, а в виде икосаэдрической атомной конфигурации (рис. 4).

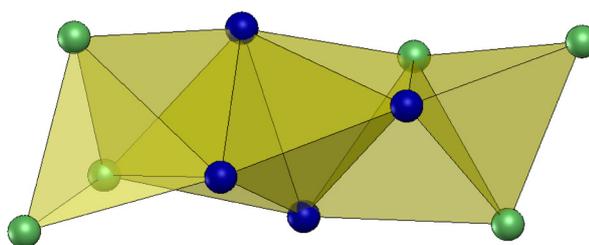


Рис. 4. Тетраэдрически плотно упакованный кластер, моделирующий метастабильное состояние структуры  $\text{Ni}_4\text{Ti}_3$ : здесь центральный тетраэдр (показанный темными шарами) иллюстрирует позиции четырех атомов никеля, а слева (и справа) светлые шары показывают позиции трех атомов титана. Сочленяясь друг с другом, указанные элементы образуют бесконечную спираль

Fig. 4. A tetrahedrally close-packed cluster modeling the metastable state of the  $\text{Ni}_4\text{Ti}_3$  structure: here the central tetrahedron (shown by dark balls) illustrates the positions of four nickel atoms, and on the left (and right) light balls show the positions of three titanium atoms. Articulating with each other, these elements form an endless spiral.

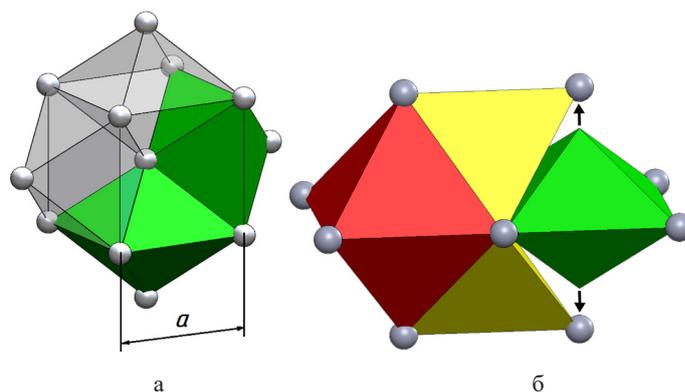


Рис. 5. Преобразование октаэдрического кластера ОЦК-решетки в октаэдрический кластер ГЦК-решетки: а – исходная ОЦК-структура; б – схема преобразования (стрелками помечено смещение атомов ОЦК в позицию атомов ГЦК) [12]

Fig. 5. Transformation of an octahedral cluster of a bcc lattice into an octahedral cluster of a fcc lattice: a – initial bcc structure; б – transformation scheme (arrows mark the displacement of bcc atoms to the position of fcc atoms) [12]

Следует заметить, что в вершинах примитивного куба на рис. 5б атомы отсутствуют. Согласно [11] решетка с кубической симметрией может и не содержать атомы в вершинах куба, поэтому наблюдаемые нами наборы рефлексов кубической решетки будут представлять собой экстрарефлексы, которые по своей природе отличаются от сверхструктурных рефлексов, вызванных атомным упорядочением.

Теперь рассмотрим взаимодействие  $\alpha$ -хрома (ОЦК) с параметром 2,837 Å со спиральным образованием, представленным на рис. 5.

По нашему мнению, в зоне контакта ОЦК-кристалла с ГЦК-решеткой или тетраэдрической плотноупакованной спиралью, состоящей только из тетраэдрических элементов ГЦК-решетки, может произойти смещение атомов ОЦК решетки на расстояние, равное  $0,15 \times a$  ГЦК решетки (это расстояние показано стрелками вверх и вниз на рис. 5).

Обычно длины всех межатомных связей стремятся к «выравниванию», что легко связать с энергией отталкивания, обычно описываемой потенциалами  $\frac{B}{r^n}$ , где  $r$  – межатомное расстояние,  $n$  – натуральный ряд чисел, а  $B$  – константа [13]. Автор показал, что отталкивание в симметричных структурах, как, например, кластеры ГЦК-решетки, играет значительно меньшую роль. При больших деформациях, когда энергия системы определяется главным образом силами отталкивания, наиболее стабильными оказываются те структуры, в которых все связи имеют примерно одинаковую длину [13].

В схеме, предложенной на рис. 5б, важным допущением является то, что смещение атомов в октаэдре не приведет к существенному изменению геометрического объема октаэдра за счет скоординированной подстройки всех атомов октаэдра ОЦК к новым положениям, по сути представляющим октаэдры ГЦК-никеля.

Рассмотрим, в каких соотношениях будут находиться параметры ОЦК и ГЦК на основании модели, представленной на рис. 5 [12]. Исходный параметр кристаллической решетки ОЦК-хрома – 2,837 Å, эта же величина представляет собой параметр неправильного октаэдра ОЦК (рис. 5а). Длина ребра правильного октаэдра ГЦК с условием сохранения геометрического объема при пе-

реходе ОЦК→ГЦК (рис. 5б) при таком параметре ОЦК составит 2,53 Å (напоминаем, что длины ребер правильных и октаэдра, и тетраэдра ГЦК совпадают, см. рис. 4а). Эта величина соответствует найденной ранее длине ребра тетраэдрического элемента, представленного на рис. 5.

Таким образом, расчеты показывают, что в областях контакта фаз может происходить переход из несимметричных кластеров ОЦК-решетки хрома в симметричные кластеры ГЦК-решетки хрома, как это показано на рис. 4б. В свою очередь, кластеры ГЦК-решетки хрома могут быть присоединены к тетраэдрической спирали (состоящей только из тетраэдрических элементов ГЦК-никеля) с рис. 5, в то время как со стороны никеля к этой спирали примыкают полноценные правильные тетраэдрические и октаэдрические кластеры ГЦК-никеля.

С помощью кластерных представлений предложена кластерная модель межзеренных границ. Эта модель плотноупакованных тетраэдрических кластерных спиралей позволяет когерентно адаптироваться друг к другу соседним зернам при деформациях сдвиг-поворот. Модель согласуется с современными теоретическими и экспериментальными результатами и может быть использована для описания процессов в металлах, подвергнутых экстремальным воздействиям [14,15].

При старении сплава при 700 °С в матрице сплава на основе никеля протекает прерывистый распад с образованием ламелей Р-фазы и обедненных участков матрицы хромом между пластинками  $\gamma$ -фазы (рис. 6). Одновременно с этим происходит распад и во второй фазе – Р-фазе, причем распад носит характер гомогенного с выделением фазы на основе никеля.

При старении объемная доля и размеры частиц Р-фазы возрастают с увеличением времени старения (рис. 6), достигая максимальных значений за 5...10 ч старения, соответственно, сплав упрочняется выше  $\sigma_b=1400$ МПа, но теряет пластичность ( $\delta < 5$ ).

При увеличении времени старения выше 10 ч увеличение температуры старения выше 800 °С приводит к уменьшению прочностных свойств в связи с началом процесса коагуляции в ячейках прерывистого распада, а при больших температурах сфероидизацией ламелей Р-фазы.

На рис. 7 изображена структура сплава 47ХНМ, подвергнутого температурным воздействиям. Видно формирование протяженных межграницных межзеренных образований. При большой электронной плотности структуры возникают яркие светлые участки на изо-

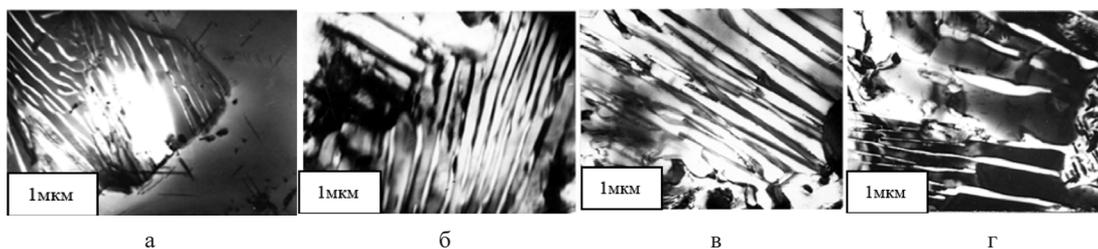


Рис. 6. Микроструктура прерывистого распада в сплаве 47ХНМ после закалки от 1250 °С, 1 мин и старения при температурах: а – 700 °С, 1 ч; б – 700 °С, 3 ч; в – 700 °С, 5 ч; г – 700 °С, 10 ч

Fig. 6. Microstructure of discontinuous decomposition in alloy 47XNM after quenching from 1250 °С, 1 min. and aging at temperatures: а – 700 °С, 1 hour; б – 700 °С, 3 hours; в – 700 °С, 5 hours; г – 700 °С, 10 hours

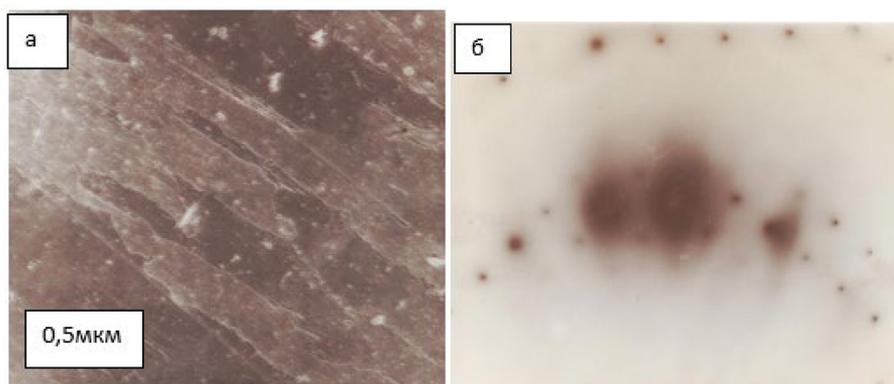


Рис. 7. Электронно-микроскопическое изображение участка прерывистого выделения Р-фазы – Cr-Mo-Ni со сфероидизацией: а – светлопольное изображение; б – микродифракция со светлого участка

Fig. 7. Electron microscopic image of an area of intermittent precipitation of P phase – Cr-Mo-Ni with spheroidization: a – bright-field image; б – microdiffraction from a bright area

бражении этой структуры в электронном микроскопе. Дифракционная картина, показанная на рисунке 7б, согласуется с картинами рентгеновской дифракции, представленными ранее на рис. 1.

На дифракционных картинах (см. рис. 1а, б, в) в области малых углов диффузное гало может соответствовать структуре ближнего порядка, где присутствует фаза с тетраэдрически плотно упакованной структурой, согласованная когерентно с ГЦК-структурой никеля. На дифракционной картине 1г отсутствует такое яркое диффузное гало, как на рис. 1а, б, в, что может быть связано с перестройкой ближнего атомного порядка к новой структуре плотноупакованных тетраэдров. В работе [16] впервые показана связь структуры межзеренной границы, представляющей собой спираль из плотноупакованных тетраэдров со сверхпластичностью, обнаруженной в сплаве 47ХНМ после прокатки и высокотемпературной деформации.

Нами установлено, что наибольшая сверхпластичность сплава 47ХНМ наблюдается после прокатки и деформации при 950 °С с гетерофазной структурой: с одноосными мелкими зернами ОЦК, ГЦК и межзеренной прослойкой из частиц вторичной Р-фазы (рис. 8). Светлые зерна – это частицы, обогащенные молибденом, который имеет большую электронную плотность (рис. 8а). Структура после сверхпластической деформации с развитой межзеренной поверхностью показана на рис. 7б. В процессе такой деформации наблюдается рост и сфероидизация зерен матрицы, растворение (уменьшение объемной доли) частиц вторичной фазы по сравнению с недеформированной, но нагретой при таких же условиях частью образца (рис. 8а).

### Заключение

Дисперсионно-твердеющий сплав 47ХНМ является сплавом специального назначения. С увеличением времени отжига до 5 ч, так же как и времени старения до 10 ч наблюдается значительное повышение прочностных свойств сплава, а также его микротвердости. Появляется и растет намагниченность насыщения и коэрцитивная сила, что можно объяснить структурной

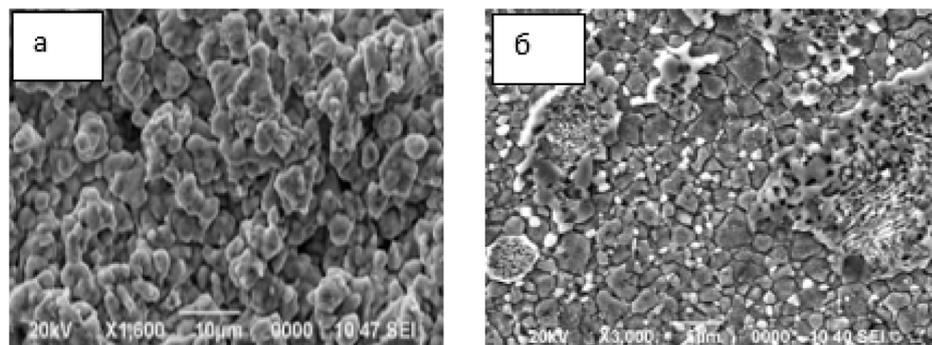


Рис. 8. Изменение структуры сплава 47XHM в ходе отжига и сверхпластической деформации: а – недеформированная часть (отожженная); б – сверхпластически деформированная при 950 °С часть образца (шейка)

Fig. 8. Change in the structure of the 47XHM alloy during annealing and superplastic deformation: а – undeformed part (annealed); б – part of the sample (neck) superplastically deformed at 950 °С

перестройкой ближнего и дальнего порядка в сплаве. Однако старение наряду с упрочнением приводит также к охрупчиванию сплава, поэтому альтернативным способом упрочнения является сверхпластическая обработка с последующей термической обработкой, в результате за счет однородной и мелкозернистой структуры улучшается прочность сплавов при сохранении достаточной пластичности и вязкости.

Таким образом:

1. Для получения высоких прочностных свойств термическую обработку (отжигом или старением) сплава следует проводить в интервале температур, не превышающих 700 °С и времени 5 ч.
2. Предварительная прокатка при последующей высокотемпературной обработке приводит к подавлению прерывистой реакции выделения фаз и появлению сверхпластических свойств материала 47XHM.
3. За счет формирования тетраэдрической плотноупакованной структуры межзеренных границ появляется возможность легко переключать химические связи в процессе пластической деформации без дополнительной энергии, что и обеспечивает сверхпластичность при температуре.

#### Список литературы / References

- [1] GNich T., Wadsworth J., Sherby O.D.. *Superplasticity in metals and Ceramics*. Cambridge Solid State Science Series, 1997, ISBN-13 978-0-521-56105 hardback (in United Kingdom)
- [2] Труды НИКИМТ. *Сварка в атомной промышленности и энергетике*, Том 2. Под общ. ред. д-ра. техн. наук Л. Н. Щавелива, ред.-сост. канд. тех. наук А. А. Куркумели – М.: ИздАТ, 2002, 400. [Proceedings of NIKIMT. *Welding in the nuclear industry and energy*, Volume 2. Under general. ed. Dr. tech. Sciences L. N. Schaveliva, editor-compiler. Ph.D. those. Sciences A. A. Kurkumeli – М.: Publishing House, 2002, 400. (In Rus.)]
- [3] Tussupzhanov A, Yerbolatuly D., Kveglis L. I., Filarowski A. Investigation of structural-phase states and features of plastic deformation of the austenitic precipitation-hardening co-ni-nb alloy, *Journal «Metals»* V 8, 2018, 19. (In Rus.)

[4] Skakov M., Yerbolatova G., Kantai N., Scheffler M. Investigation of the influence of electrolytic-plasma processing on structural-phase state and mechanical properties of the 40CrNiAl alloy, *Advanced Materials Research*, 2014, 1044–1045, 67–70. (In Rus.)

[5] Ерболатова Г. У., Скаков М. К., Ерболатұлы Д., Мукажанов Е. Б. 47ХНМ қорытпада микро- және наноқұрылымды фазалардың қалыптасуы және олардың беріктік қасиеттерге әсері. *Региональный вестник Востока, изд. ВКГУ, Усть-Каменогорск*. 2007, № 4, 3–9 [Erbolatova G. U., Skakov M. K., Erbolatuly D., Mukajanov E. B. Formation of micro- and nanostructured phases in 47HNM alloy and their influence on strength properties. *Regional newspaper Vostoka, izd. VKSU, Ust-Kamenogorsk*. 2007, No. 4, 3–9 (in Kazakhstan)]

[6] Yuan L., Hu R., Li J. Evolution behavior of superlattice phase with Pt<sub>2</sub>Mo-type structure in Ni–Cr–Mo alloy with low atomic Mo/Cr ratio, *Published online by Cambridge University Press*, 15 February 2016 (in United Kingdom)

[7] Скаков М. К., Мукажанов Е. Б., Ерболатұлы Д., Исаева Ж. М. Изменение микроструктуры пружинного Cr–Ni сплава после старения, *Известия Томского политехнического университета*, 2007. Т. 311. № 2. 119–122. [Skakov M. K., Mukazhanov E. B., Erbolatuly D., Isaeva Zh. M. Change in the microstructure of spring Cr–Ni alloy after aging, *News of Tomsk Polytechnic University*, 2007. T. 311. No. 2. 119–122. 9 (In Rus.)]

[8] Ключников Г. М., Ключников И. Г. Устойчивая сверхпластическая деформация и теплообмен, *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2015 г., № 8–3. 458–465 [Klyuchnikov G. M., Klyuchnikov I. G. Sustained superplastic deformation and heat transfer, *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2015, no. 8–3. 458–465 (In Rus.)]

[9] Cryst Acta. (1957). The Crystal Structure of the P Phase, Mo–Ni–Cr. II. Refinement of Parameters and Discussion of Atomic Coordination\* BY DAWD P. S~O~.~AKE~, CI~A BRr~K SHO~.~A~R A~D ~A~K C. WILSO~, *Department of Chemistry*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge 39, Massachusetts, (in U.S.A).

[10] Крапошин В. С. Золотое сечение в структуре металлов, *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2005 г., № 8. 3–10 [Kraposhin V. S. The golden ratio in pass-through metals, metal science and heat treatment of metals. 2005, No. 8. 3–10(In Rus.)]

[11] Пирсон У. *Кристаллохимия и физика металлов и сплавов*, М.: Мир, Т2, 1977 [Pearson W. *Crystal chemistry and physics of metals and alloys*, М.: Mir, Т2, 1977(In Rus.)]

[12] Noskov F. M. Kveglis L. I. Description of Polymorphic Transformations in Metals Relying on the Cluster Model of Structure, *Formation Chemistry for Sustainable Development 26* (2018) 509–514 DOI: 10.15372/CSD 20180509 (In Rus.)

[13] Бердетт Дж. *Химическая связь* М.: Мир, 2008. 245 с. [Burdett J. *Chemical bond* М.: Mir, 2008. 245 p. (In Rus.)]

[14] P. Villars, K<sub>2</sub>Sn(OH)<sub>6</sub> (K<sub>2</sub>Sn[OH]<sub>6</sub>) Crystal Structure, PAULING FILE in: *Inorganic Solid Phases, SpringerMaterials*, Springer, Heidelberg (ed.) Springer Materials.2016 (in United Kingdom)

[15] Beyer M. K., Clausen-Schaumann H. Mechanochemistry: mechanical activation of covalent bonds. *Chemical Reviews* 2005, 105, 2921. (in U.S.A).

[16] Medlin D., Foiles S. M., Cohen D. A dislocation-based description of grain boundary dissociation: Application to a 90 degrees tilt boundary in gold, *Acta Materialia*. 49,2001, 3689–3697 (in United Kingdom)

EDN: SLUCUO

УДК 621.745:621.746:621.791:669.017

## **Strengthening of Electrically Conductive Cu–MMNCr Composite Material with a Copper- Based Metal Matrix by Nano- and Micro- Sized Chromium Particles**

**Sergei L. Busygin\***,  
**Nikolai N. Dovzhenko, Aleksandr M. Tokmin,**  
**Aleksandr A. Shaichadinov, Sergei V. Mishnev**  
*Siberian Federal University*  
*Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 18.01.2024, received in revised form 23.01.2025, accepted 09.04.2025

**Abstract.** The article discusses the mechanisms of dispersion strengthening by nanosized chromium particles of a composite material with a copper-based metal matrix (Cu–MMNCr) without loss of electrical conductivity from which resistance welding electrodes are made. A study of the fractional composition of chromium nanopowder after grinding in a planetary-centrifugal mill was carried out and a method of introducing it into a copper melt using a tablet alloy was proposed. Uniform distribution of nanosized chromium particles in the melt is achieved by stirring by frequency modulation of current (in the range of 35–40 Hz from the operating frequency) in an alternating electromagnetic field. A thermodynamic analysis of the formation of reactions of interaction between melt components during the preparation of the Cu–MMNCr composite material was carried out. The wetting of nanosized chromium particles and lump chromium by copper melt was studied. A model of dispersion strengthening by nanosized chromium particles in structural changes of a composite material with a copper-based metal matrix, built on the fuzzy set hypothesis, is considered. The mechanical and electrical conductive properties of the Cu–MMNCr composite material were studied.

**Keywords:** resistance welding electrodes, copper-based composite material, frequency modulation of current, theory of fuzzy sets.

**Acknowledgements.** The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (scientific topic code FSRZ-2020–0011).

Citation: Busygin S. L., Dovzhenko N. N., Tokmin A. M., Shaichadinov A. A., Mishnev S. V. Strengthening of Electrically Conductive Cu–MMNCr Composite Material with a Copper-Based Metal Matrix by Nano- and Micro-Sized Chromium Particles. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(3), 392–408. EDN: SLUCUO



© 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: politex\_1999@bk.ru

# Упрочнение нано- и микроразмерными частицами хрома электропроводного композиционного материала Cu–MMNCr с металлической матрицей на основе меди

С. Л. Бусыгин, Н. Н. Довженко,  
А. М. Токмин, А. А. Шайхадинов, С. В. Мишнев  
*Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск*

**Аннотация.** В статье рассмотрены механизмы дисперсно-дисперсионного упрочнения наноразмерными частицами хрома композиционного материала с металлической матрицей на основе меди (Cu–MMNCr) без потери электропроводности, из которого изготавливают электроды контактной сварки. Выполнено исследование фракционного состава нанопорошка хрома после помола в планетарно-центрифужной мельнице, и предложен способ его введения в медный расплав с помощью таблетированной лигатуры. Равномерное распределение наноразмерных частиц хрома в расплаве достигается перемешиванием частотной модуляцией тока (в интервале 35–40 Гц от рабочей частоты) в переменном электромагнитном поле. Проведен термодинамический анализ образования реакций взаимодействия компонентов расплава в процессе приготовления композиционного материала Cu–MMNCr. Исследовано смачивание наноразмерных частиц хрома и кускового хрома медным расплавом. Рассмотрена модель дисперсно-дисперсионного упрочнения наноразмерными частицами хрома в структурных изменениях композиционного материала с металлической матрицей на основе меди, построенная на гипотезе нечётких множеств. Исследованы механические и электропроводные свойства композиционного материала Cu–MMNCr.

**Ключевые слова:** электроды контактной сварки, композиционный материал на основе меди, частотная модуляция тока, теория нечетких множеств.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код научной темы FSRZ-2020–0011).

Цитирование: Бусыгин С. Л. Упрочнение нано- и микроразмерными частицами хрома электропроводного композиционного материала Cu–MMNCr с металлической матрицей на основе меди / С. Л. Бусыгин, Н. Н. Довженко, А. М. Токмин, А. А. Шайхадинов, С. В. Мишнев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(3). С. 392–408. EDN: SLUCUO

## Введение

Металломатричные композиционные (ММК) материалы на основе меди применяются во многих отраслях промышленности, электронике и связи, обладают высокой прочностью, хорошей электро- и теплопроводностью [1, 2]. Однако стратегии, которые широко используются для повышения прочности в сплавах меди, неизменно включают введение дефектов, таких как атомы растворенного вещества, дислокации, границы зерен и вторые фазы, которые неизбежно приводят к дополнительному рассеянию электронов с сопутствующим снижением электропроводности [3]. Таким образом, как правило, существует противоречие между высокой прочностью и высокой электропроводностью, в связи с чем поиск компромисса в данном случае играет решающую роль в разработке состава и технологии производства сплавов меди. На наш взгляд, поиск такого компромисса должен строиться на системном подходе и итеративном процессе анализ-синтез, как показано на рис. 1.

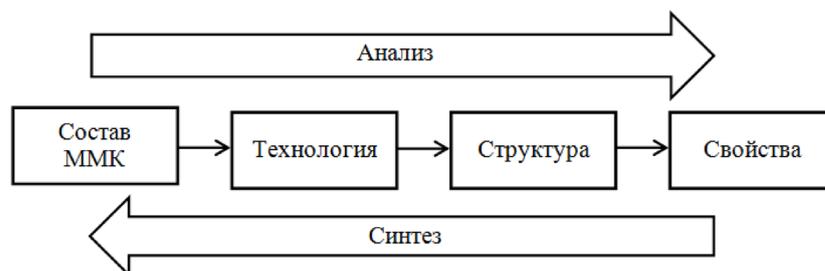


Рис. 1. Системная модель поиска компромисса для центральной парадигмы материаловедения и инженерии при разработке ММК с высокой прочностью и электропроводностью

Fig. 1. A system model for finding a compromise for the central paradigm of materials science and engineering in the development of MMCs with high strength and electrical conductivity

Установление компромиссного соотношения между прочностью, твёрдостью и электропроводностью в проводнике является фундаментальным научным вопросом [4]. Немногие публикации направлены на объяснение и моделирование электропроводности двухфазных или многофазных нано- и микрокомпозитов, изучение влияния размеров зёрен на перенос электронов в металлах [5]. Причём большинство созданных моделей оценки электропроводности объединяет то, что их проверка экспериментальными данными часто является неудовлетворительной из-за недостаточной количественной информации о микроструктурном состоянии образцов.

Для лучшего понимания этих специфических взаимосвязей между микроструктурными особенностями и сочетанием электрических и механических свойств необходимо сначала оценить электрическое удельное сопротивление [6]. Эффективное удельное сопротивление сплава ( $\rho$ ), в силу правила Маттисена–Флеминга [7,8], обычно записывается следующим образом (1):

$$\rho = \rho_T + \rho_D, \quad (1)$$

где  $\rho_T$  – является температурно-зависимым фоновым вкладом;  $\rho_D$  – вклад дефектов решётки и растворённых веществ, который не зависит от температуры [9].

Температурно-независимая часть описывает удельное сопротивление от различных дефектов (2) и, таким образом, может быть разделена на несколько составляющих [10,11]:

$$\rho_D = \rho_{ss} + \rho_p + \rho_{dis} + \rho_v + \rho_{gs}, \quad (2)$$

где  $\rho_{ss}$  – удельное сопротивление за счёт рассеяния электронов растворёнными атомами в матрице;  $\rho_p$  – удельное сопротивление, прибавленное частицами второй фазы;  $\rho_{dis}$  – удельное сопротивление из-за дислокаций;  $\rho_v$  – удельное сопротивление из-за вакансий;  $\rho_{gs}$  – удельное сопротивление за счёт рассеяния на границах зёрен.

Следует отметить, что  $\rho_p$ , в свою очередь, может состоять из нескольких вкладов, связанных с различными видами выделений в микроструктуре (такими, как зоны Гинье–Престона, некогерентные и когерентные выделения) [12].

Согласно правилу (1), изменение концентрации примеси в твёрдом растворе хромовой бронзы прямо пропорционально изменению удельного электрического сопротивления сплава [13].

Твёрдость материала (3) можно описать аналогично, как это сделано в работе [14]:

$$HV = HV^{Cu} + \sum_i \Delta HV_i^{sol} + \Delta HV^{dislo} + \Delta HV^{GB} + \Delta HV^{precip}, \quad (3)$$

где  $HV^{Cu}$  – твёрдость чистой меди;  $\Delta HV_i^{sol}$  – упрочнение эффектом твёрдого раствора от  $i$ -го элемента;  $\Delta HV^{dislo}$  – деформационное упрочнение дислокациями;  $\Delta HV^{GB}$  – упрочнение границами зерна;  $\Delta HV^{precip}$  – упрочнение дисперсными выделениями.

Роль границ зёрен в пределе текучести материалов была давно рационализирована Холлом и Пётчем, твёрдость сплава можно записать в следующем виде (4):

$$HV = HV^{Cu} + K_{HV} \cdot d^{-1/2}, \quad (4)$$

где  $HV^{Cu}$  – твёрдость по Виккерсу;  $K_{HV}$  – коэффициент;  $d$  – размер зерна.

Как следует из (1–4), поиск компромиссного решения электропроводность – твёрдость следует искать в применении только тех параметров, которые ведут к повышению ( $\Delta HV$ ) без существенного изменения ( $\rho_D$ ) при этом.

Для установления параметров, обеспечивающих упрочнение композиционного материала Cu–MMNCr, необходимо определить и обосновать воздействие различных факторов и технологических режимов, оказывающих влияние на структурные характеристики, механические и физические свойства сплава при вводе таблетированной лигатуры Cu–Cr (порошок меди с наполнителем из наноразмерных частиц хрома). Также обосновать все технологические операции, начиная с технологии изготовления таблетированной лигатуры Cu–Cr и ее введения в расплав, до получения готовых изделий в виде электродов контактной сварки.

Учитывая вышеперечисленное, можно сформулировать следующую цель работы – исследовать фракционный состав порошка хрома после помола, разработать способ его введения в расплав и построить модель дисперсно-дисперсионного упрочнения наноразмерными частицами хрома в структурных изменениях композиционного материала с металлической матрицей на основе меди.

### 1. Материалы, оборудование и методика проведения экспериментов

Для исследований взят композиционный материал Cu–MMNCr, соответствующий сплаву С 81300–С 82800 [15] системы Cu – 1,0 мас.% Cr (БрХ1).

Для приготовления расплава использовали индукционную печь с графитовым тиглем. Масса загружаемого в графитовый тигель индукционной печи металла составляла 1 кг. Плавку осуществляли под слоем древесного угля толщиной 25–30 мм. Легирующий элемент в расплав вводили с помощью таблетированной лигатуры гетерогенного состава, состоящей из базовых элементов: матрицы 0,83 мас.% медного порошка марки ПМС-1 по ГОСТ 4960–2017 и 0,17 мас.% наноразмерных частиц хрома Х99 по ГОСТ 5905–2004 [16]. Смешивание порошков в пропорциях производили в вибрационной мельнице RETSCH MM 400. Таблетированную лигатуру Cu–Cr получали холодным прессованием в пресс-форме диаметром 40 мм. Давление прессования составляло 300 МПа, необходимое номинальное усилие пресса более 80 кН, плотность получаемой таблетки 6,30 г/см<sup>3</sup>, масса 120 гр.

Расплав заливали в металлическую форму, при достижении металлом температуры 950 °С производили прошивку на механическом прессе К117Д канала для охлаждения электрода в процессе эксплуатации.

Для выполнения операции старения электроды нагревали в муфельной печи СНОЛ-1.62.5.1/11–ИЗ при температуре 450 °С в течение 4 часов [16].

Исследования смачивания хрома расплавами меди проводили на универсальной вакуумной установке «Капля».

Из изготовленных электродов вырезали образцы для исследования микроструктуры. Образцы подвергали тонкой шлифовке и полировке. Шлифовку проводили на абразивах разной степени дисперсности. Для окончательного выравнивания поверхности шлиф полировали до зеркального блеска, используя алмазную пасту АСМ 0,25/0 НОМ по ГОСТ 25593–83. Микроструктуру образцов и элементный состав исследовали на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-7001F с использованием контраста во вторичных электронах и энергодисперсионного микроанализа (EDX) [16].

Измерения удельной электрической проводимости образцов осуществляли по ГОСТ 27333–87 на микроомметре Ф4104–М1 [16].

Измерения твердости образцов осуществляли по ГОСТ 9013–59 на твердомере ТР 5014 по шкале твердости F при величине испытательной нагрузки  $P=588,4$  Н, диаметр шарика 1,588 мм. Измерения микротвердости образцов осуществляли по ГОСТ 9450–76 на приборе ПМТ-3 при величине испытательной нагрузки  $P=0,098$  Н с интервалом между замерами 150–200 мкм [16].

## **2. Результаты экспериментов и их обсуждение.**

### **Исследование фракционного состава нанопорошка хрома после помола и разработка способа его введения в расплав**

Исходный порошок хрома марки Х99 (размерами 10–100 мкм) представлен на рис. 2а, а после помола в планетарно-центробежной мельнице ПЦМ-50–НАНО происходит значительное измельчение и изменение его морфологии (рис. 2б). Микрорентгеноспектральный анализ рис. 2с порошка хрома до и после помола показывает наличие 100 % хрома в спектре.

В процессе измельчения порошка в мельнице за счет воздействия больших инерционных сил на мелющие тела и обрабатываемый материал происходит механохимическая активация хрома [17], приводящая к коренному преобразованию его структуры. Статистические характеристики распределения порошка хрома по размерам после помола приведены в рис. 3.

Получаемая таблетированная лигатура Cu–Cr представлена на рис. 4.

Технология изготовления наноразмерных частиц играет важную роль в формировании структурных дефектов на их поверхности, что влияет на смачиваемость и скорость растворения в расплаве, в связи с чем в изучении данного вопроса в большей мере приходится опираться на экспериментальные данные. В реакциях растворения частицы в расплаве, имеющих разные составы, происходит два последовательных процесса: термоактивируемый атомный перенос через поверхность раздела – процесс на границе раздела (поверхностная стадия), диффузия на дальние расстояния (много больше межатомных – диффузионная стадия). Процесс растворения твёрдых тел в жидкостях протекает в две стадии [18]:

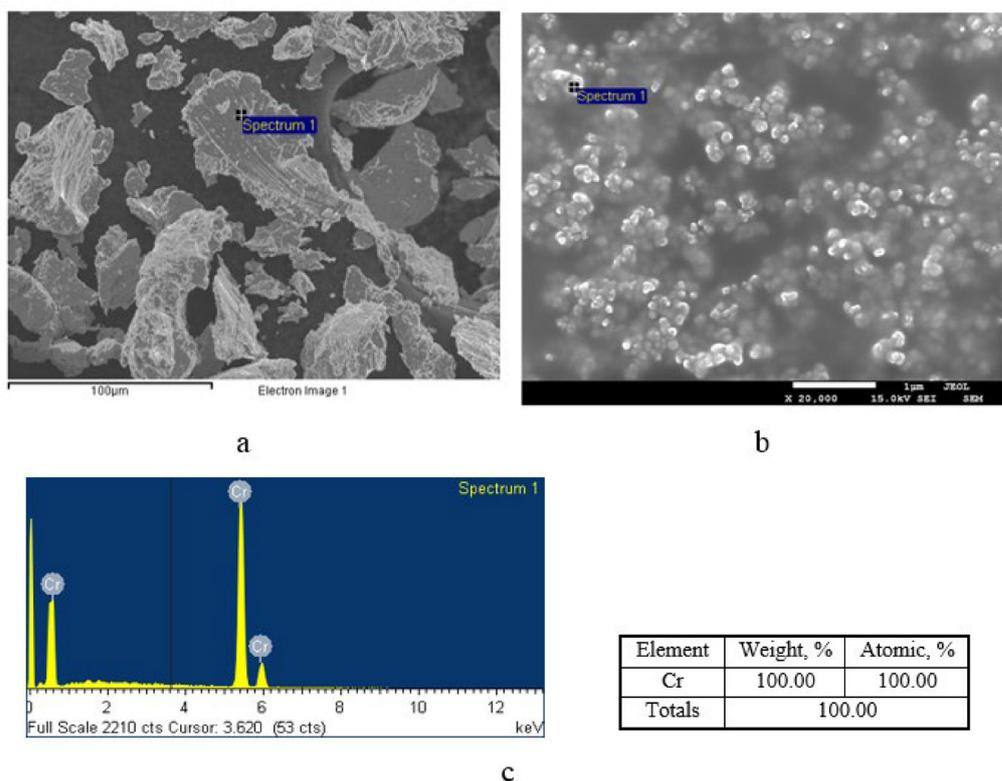


Рис. 2. Морфология исходного порошка хрома (а) и порошка хрома после помола (б), микрорентгеноспектральный анализ порошка хрома до и после помола (с)

Fig. 2. Morphology of the initial chromium powder (a) and chromium powder after grinding (b), microrentgenospectral analysis of chromium powder before and after grinding (c)

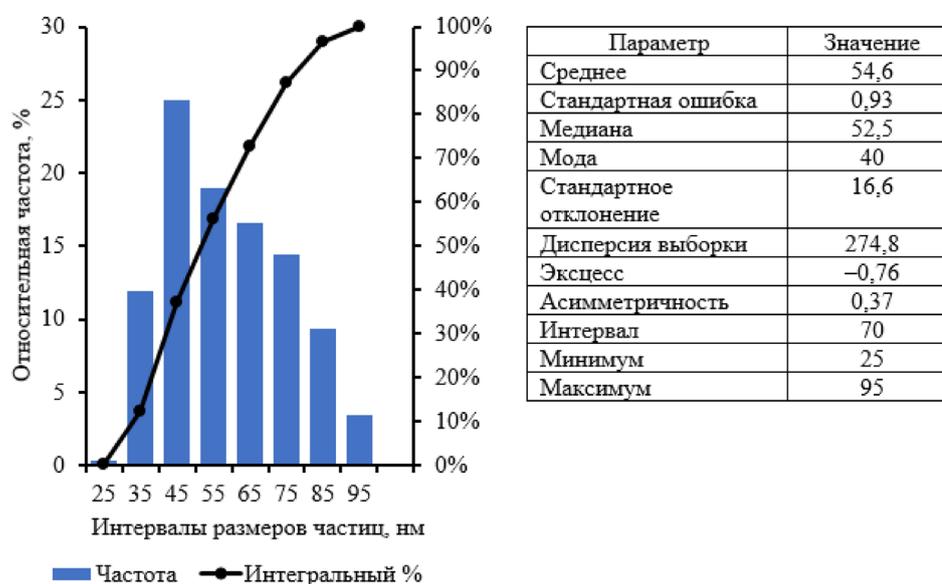


Рис. 3. Статистические характеристики распределения порошка хрома по размерам после помола

Fig. 3. Statistical characteristics of chromium powder distribution by size after grinding

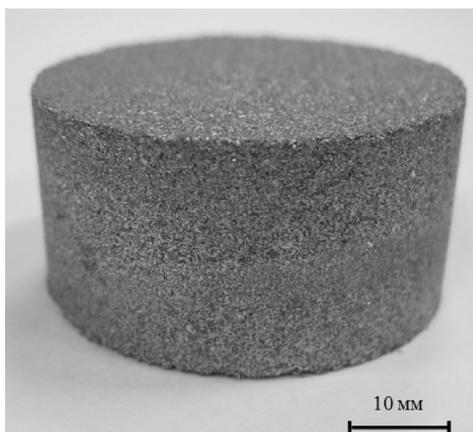


Рис. 4. Таблетированная лигатура Cu–Cr

Fig. 4. Cu–Cr Tableted Ligature

а) взаимодействие твёрдого тела с растворителем, завершающееся образованием вокруг поверхности растворяемого вещества насыщенного раствора;

б) отвод растворенного вещества в объём раствора путём диффузии.

Обе стадии протекают с различной скоростью, и кинетика растворения зависит от соотношения этих скоростей.

#### **Термодинамический анализ образования реакций взаимодействия компонентов расплава в процессе приготовления композиционного материала Cu–MMNCr**

Хром как переходный металл образует с медью систему с ограниченной растворимостью. При вводе этого элемента в медный расплав существует сложность в виде образования тугоплавкой оксидной пленки на поверхности Cr, поэтому необходимо с помощью раскислителя оценить возможность ее восстановления. Для этого использовали программу HSC Chemistry 8.0.

Добавление в медный расплав лигатуры фосфористой меди в количестве 0,05 мас.% [19] раскисляет оксид меди  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Полученная по результатам оценки реакция имеет отрицательную энергию Гиббса (табл. 1). Реакция раскисления оксида хрома  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  фосфористой медью при этих температурах термодинамически невозможна. Полученная по результатам оценки реакция имеет положительную энергию Гиббса (табл. 1). В нашем случае фосфористая медь как раскислитель только снижает содержание кислорода в расплаве меди перед введением наноразмерных частиц хрома.

Физическая природа понижения температуры плавления наночастиц сводится к следующему: доля поверхностных атомов возрастает с изменением размера частицы в меньшую сторону, энергия связи этих атомов меньше, чем атомов в объеме, поэтому на тепловое движение для выполнения фазового перехода твердое тело–жидкость затрачивается меньшая энергия (табл. 2) [20].

На основании анализа этих данных, при определенном времени выдержки расплава  $t_{\text{в}}=5$  минут, после ввода таблетированной лигатуры Cu–Cr при температуре 1250 °C наноразмерные

Таблица 1. Расчетные значения энергии Гиббса и константы равновесия реакций взаимодействия компонентов расплава

Table 1. Calculated values of Gibbs energy and equilibrium constants of reactions of interaction of melt components

Реакция	Результат			
	T, °C	$\Delta G$ , кДж/моль	K	log K
$5\text{Cu}_2\text{O} + 2\text{P} = \text{P}_2\text{O}_5 + 10\text{Cu}$	1000,000	-542,319	1,787E+022	22,252
	1100,000	-537,498	2,806E+020	20,448
	1200,000	-541,009	1,530E+019	19,185
	1300,000	-532,308	4,744E+017	17,676
$5\text{Cr}_2\text{O}_3 + 6\text{P} = 10\text{Cr} + 3\text{P}_2\text{O}_5$	1000,000	1246,247	7,326E	-51,135
	1100,000	1246,048	3,948E	-47,404
	1200,000	1244,946	7,133E	-44,147
	1300,000	1242,892	5,343E	-41,272

Таблица 2. Температура плавления наночастиц хрома [20]

Table 2. Melting point of chromium nanoparticles [20]

Элемент	$T_0$ , К	d, нм	$T_m$ , К r=1 нм	$T_m$ , К r=10 нм	$T_m$ , К r=50 нм	$\Delta T=(T_0-T_m)$ , К r=1 нм
Cr	2173	3,8	452,7	1574,6	2019,5	1720,3

частицы Cr равномерно распределяются в расплаве за счет перемешивания частотной модуляцией тока (в интервале 35–40 Гц от рабочей частоты) в переменном электромагнитном поле [21]. Установлено, что данный вид перемешивания позволяет увеличивать седиментационную устойчивость наноразмерных частиц хрома в медном расплаве, что подтверждается результатами картирования (рис. 5b).

### Исследование смачивания хрома медным расплавом

Важнейшим фактором, происходящим на границе раздела фаз твердый компонент (хром)–жидкий компонент (медный расплав), является процесс смачивания.

На рис. 6 показано в сравнении растекание жидкой меди по твердой подложке, выполненной из спрессованных наноразмерных частиц хрома (рис. 6a) и кускового хрома (рис. 6b). Механохимическая активация хрома в процессе измельчения приводит к повышению активности частиц. Энергонасыщенные частицы с дефектами поверхности увеличивают проникновение жидкости в поры материала и, следовательно, способствуют возникновению стабильных сил сцепления системы жидкость–материал. Вакуумная установка «Капля» позволяет определить скорость растекания жидкого металла по подложке, а также отслеживать изменение радиуса основания капли и угла контакта с момента ее касания с подложкой.

Краевые углы смачивания медью наноразмерных частиц хрома и кускового хрома при 1250 °C составляют 45 и 135° (рис. 6) соответственно, и при дальнейшем увеличении темпера-

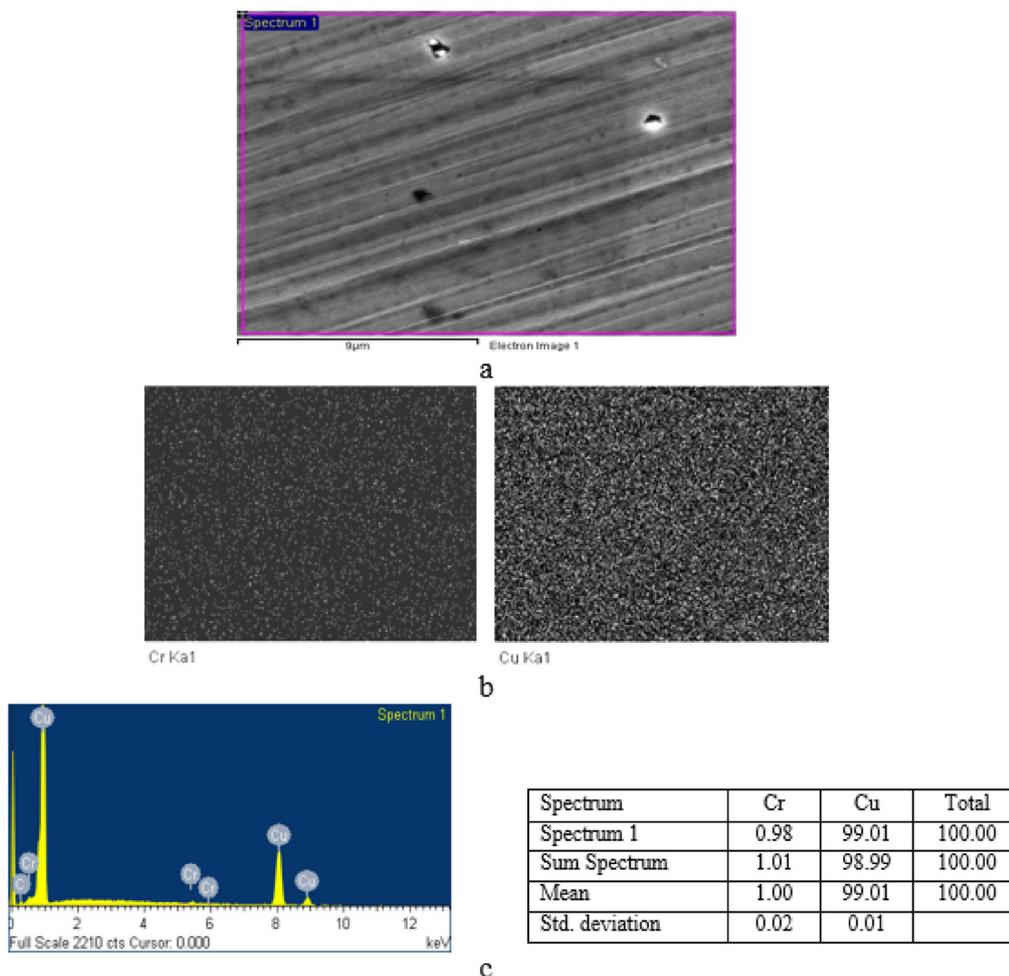


Рис. 5. Распределение наноразмерных частиц хрома (а), (b) и состав сплава (с)  
 Fig. 5. Distribution of nanoscale chromium particles (a), (b) and alloy composition (c)

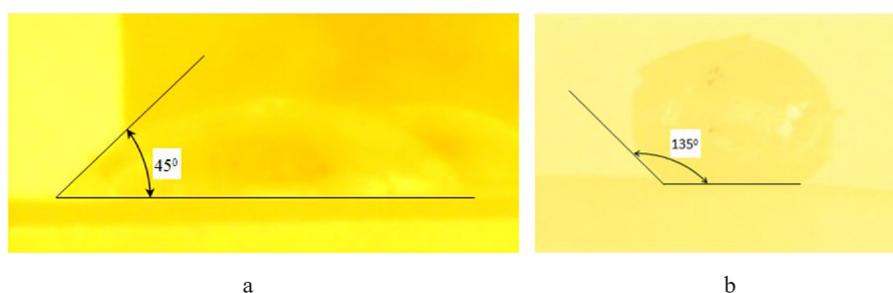


Рис. 6. Смачиваемость: (а) наноразмерных частиц хрома и (b) кускового хрома жидкой медью при температуре 1250 °С  
 Fig. 6. Wettability: (a) nanoscale chromium particles and (b) lump chromium with liquid copper at a temperature of 1250 °C

туры угол смачивания плавно уменьшается. Шероховатость гидрофобной поверхности кускового хрома ухудшает его смачивание жидкой медью, в отличие от гидрофильной поверхности из наноразмерных частиц хрома [22]. Также хорошая смачиваемость приводит к увеличению седиментационной устойчивости наноразмерных частиц хрома, введенных в расплав меди [23]. Результаты картирования показывают на равномерное распределение наноразмерных частиц хрома в сплаве (рис. 5b).

### Исследование особенностей дисперсно-дисперсионного упрочнения композиционного материала Cu–MMNCr наноразмерными частицами хрома

После литья композиционного материала без проведения операций термообработки в микроструктуре сплава можно отчетливо наблюдать нерастворившиеся наноразмерные частицы хрома, представленные на рис. 7. В нашем случае нерастворившиеся частицы хрома играют фундаментальную роль в определении конечного размера зерен в композиционном материале, поскольку они могут взаимодействовать с границами зерен, действуя как точки закрепления, замедляя или останавливая их рост [24, 25].

В процессе штамповки сплава при 950 °С температура в поверхностных слоях снижается на 225 °С за 0,17 с, и выполняется тем самым операция закалки. Из последующих операций исключается дополнительный нагрев полученных изделий для закалки, так как высокотемпературный нагрев до 1000 °С приводит к сильному окислению изделий с образованием слоя окалины. Под окалиной формируются слои внутреннего окисления из-за диффузии вглубь металла кислорода и частичного и полного окисления хрома в твердом растворе. В большинстве случаев хром может остаться в форме оксидов и не принимает участия в упрочнении при старении [26].

В закаленном состоянии композиционный материал отличается высокой пластичностью и вязкостью, при этом обладая невысокой прочностью [26]. Повысить прочность и твердость материала можно старением, при котором увеличивается объемная доля выделений второй

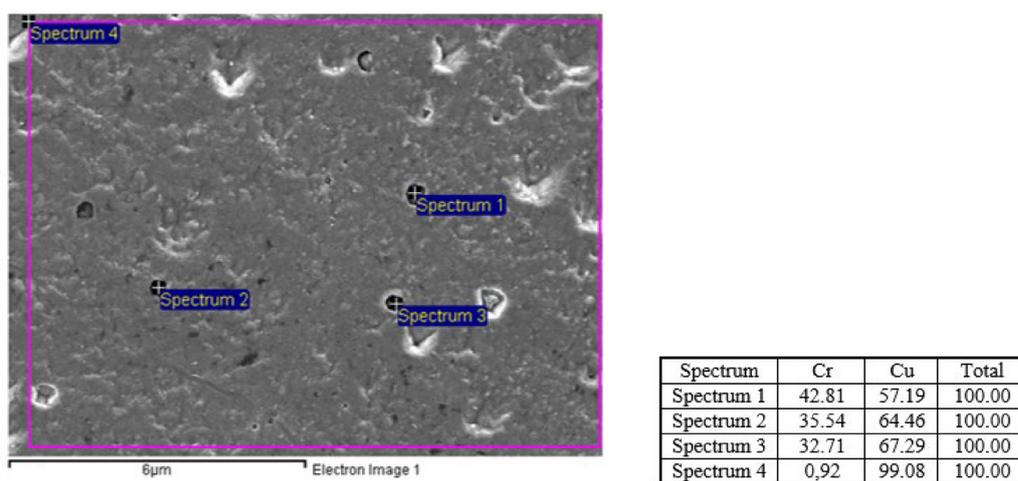


Рис. 7. СЭМ-изображение микроструктуры литого композиционного материала с элементным составом  
Fig. 7. SEM image of the microstructure of a cast composite material with an elemental composition

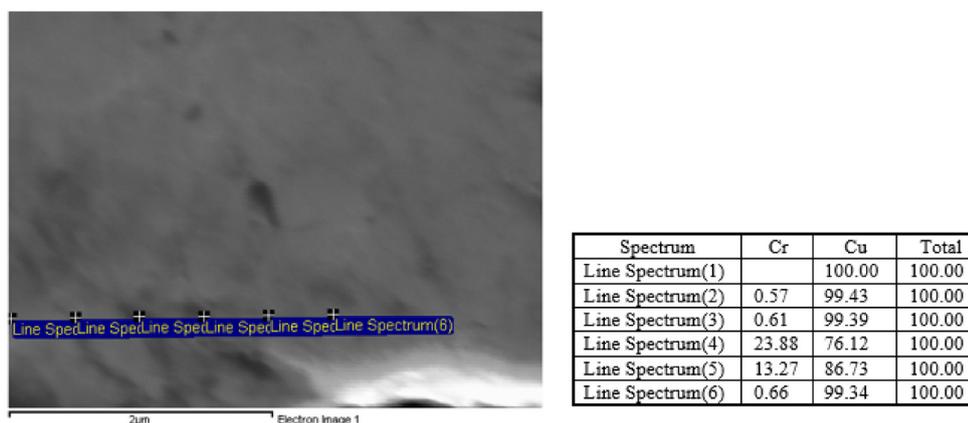


Рис. 8. СЭМ-изображение микроструктуры штампованного композиционного материала с элементным составом после операций термообработки

Fig. 8. SEM image of the microstructure of a stamped composite material with an elemental composition after heat treatment operations

фазы. Оптимальные режимы старения штампованного сплава: нагрев до 450 °С в течение 4 часов [27].

Диффузионные процессы, происходящие во время старения, снижают концентрацию легирующего элемента по сечению зерен, что проявляется в формировании микроструктуры, а элементный состав поверхности композиционного материала (рис. 8) показывает наличие частиц хрома в сплаве.

Установленный нами [28] характер термогидродинамики процесса литья в металлическую форму свободной (гравитационной) заливкой под действием сил тяжести и анализ полученной микроструктуры позволяют нам предложить следующую модель дисперсно-дисперсионного упрочнения наноразмерными частицами хрома в структурных изменениях композиционного материала с металлической матрицей на основе меди, построенную на гипотезе нечётких множеств: вводимые в расплав меди наноразмерные частицы хрома, не превышающие критического размера, соответствующего 50 % интегральной частоте (в данной работе до 54,6 нм), растворяются полностью (рис. 9), функция принадлежности  $\mu(x)=1$  или частично  $0<\mu(x)<1$  в расплаве медной матрицы, и переходят в  $\alpha$  твёрдый раствор с последующим выделением второй фазы при закалке и старении, а частицы большего размера  $\mu(x)=0$  выступают в качестве центров кристаллизации, способствуя формированию структуры сплава и обеспечивая дисперсное упрочнение.

Подход теории нечётких множеств принят исходя из следующих позиций:

– нечёткое множество отображает в себе сочетание элементов произвольной природы, с полной определённой касательно каждого из которых не следует утверждать – относится элемент рассматриваемого сочетания к этому множеству или нет;

– отсутствие в литературных данных описания и природы растворения наноразмерных частиц в расплавах металлов.

При этом линейная Z-образная функция в общем случае может быть задана аналитически следующим выражением (1):

$$\mu(x, a, b) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \leq a, \\ \frac{b-x}{b-a}, & \text{если } a < x \leq b, \\ 0, & \text{если } x > b, \end{cases} \quad (1)$$

где  $a, b$  – некоторые числовые параметры, принимающие произвольные действительные значения и упорядоченные отношением:  $a < b$ .

Для нашего случая (рис. 9b):  $a = 54,6$  нм,  $b = 74,5$  нм. При различных условиях литья параметры Z-образной функции, соответственно, будут изменяться и уточняться на основе экспериментальных данных.

Выделение в процессе старения наноразмерных частиц хрома (до 30 нм) из твердого раствора, показанное на рис. 10, а также наличие наноразмерных не растворившихся частиц хрома более крупных размеров (30–100 нм) в соотношении 60:40 % подтверждает модель дисперсно-дисперсионного упрочнения наноразмерными частицами хрома в структурных изменениях композиционного материала с металлической матрицей на основе меди, построенную на гипотезе нечётких множеств. Дифрактограмма, приведенная на рис. 11, также указывает на наличие частиц хрома в композиционном материале. Значения межплоскостных расстояний приведены в табл. 3.

Выделившиеся в сплаве частицы, в том числе избыточной фазы, имеют разную размерность и время растворения, в этом случае условия равновесия с окружающим их матричным раствором будут неодинаковы. Следовательно, величина межфазовой поверхностной энергии на единицу объема у частиц меньшего размера выше по сравнению с крупными частицами, приводит к более быстрому растворению мелких частиц и устойчивости к растворению крупных. В результате за счет растворения мелких частиц растут более крупные частицы [29].

Механические и электропроводные свойства композиционного материала показаны на диаграмме (рис. 12). Значительно повышается твердость после операции старения композицион-

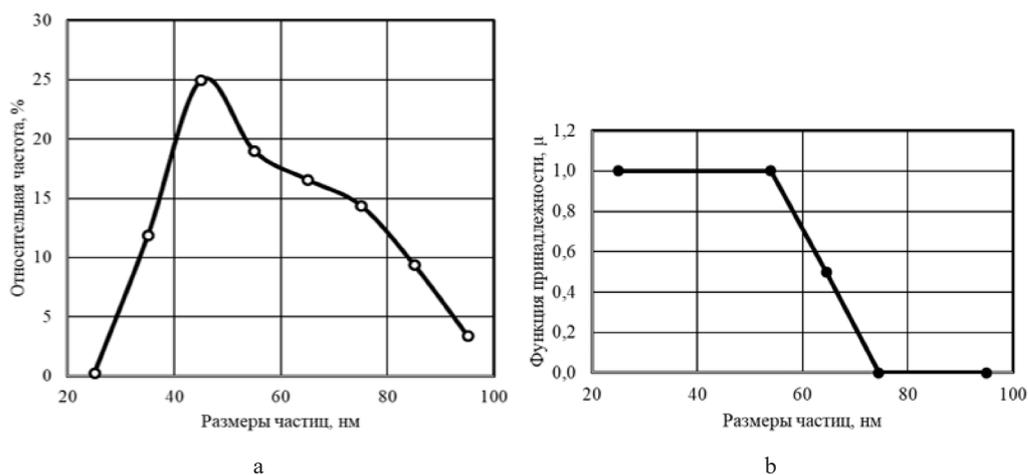


Рис. 9. Относительная частота распределения наноразмерных частиц хрома (а) и функция принадлежности к характеру их растворимости в расплаве меди (b)

Fig. 9. The relative frequency of the distribution of nanoscale chromium particles (a) and the function of belonging to the nature of their solubility in the copper melt (b)

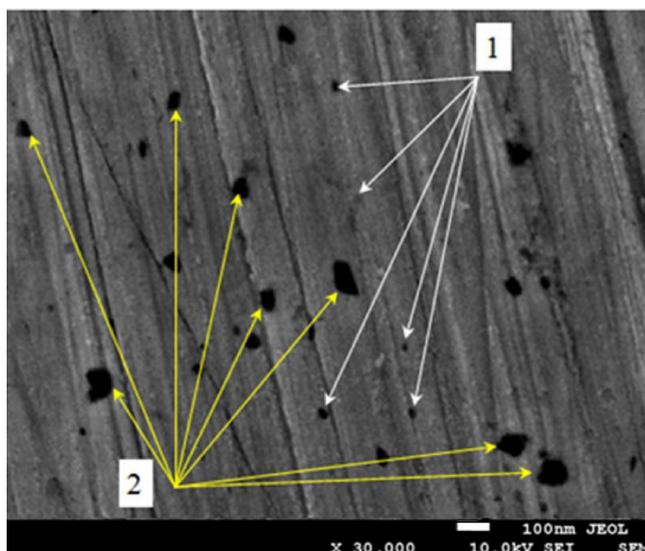


Рис. 10. СЭМ-изображения микроструктуры композиционного материала с включениями наноразмерных частиц хрома: 1 – до 30 нм; 2 – до 100 нм.

Fig. 10. SEM images of the microstructure of a composite material with inclusions of nanoscale chromium particles: 1 – up to 30 nm; 2 – up to 100 nm.

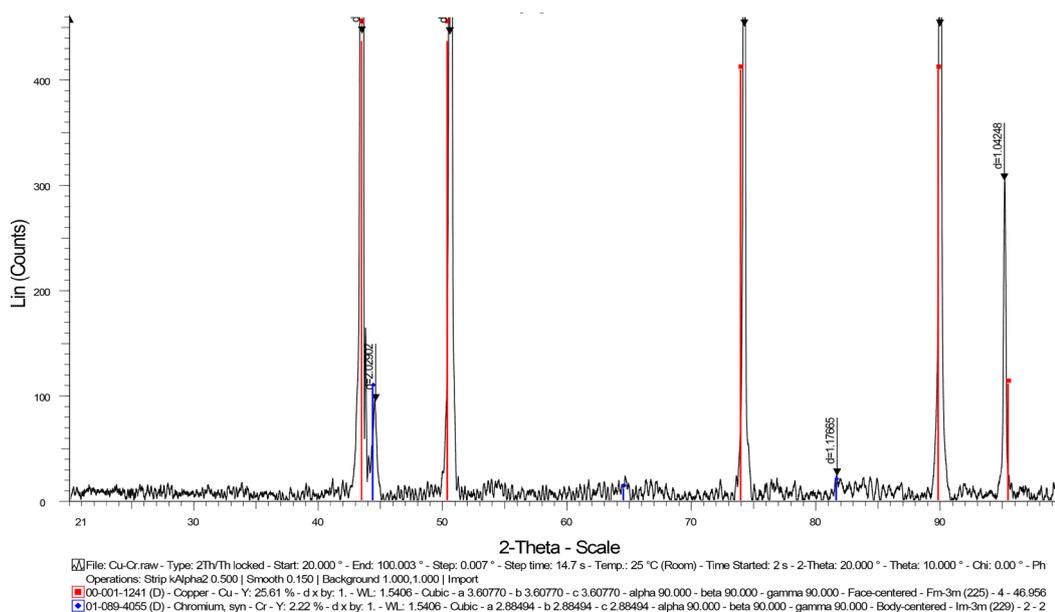


Рис. 11. Дифрактограмма композиционного материала

Fig. 11. Diffractogram of composite material

ного материала и составляет 142 НВ. Электропроводность из-за выделения дисперсных частиц хрома, приводящих к уменьшению легированности  $\alpha$  твердого раствора в процессе старения, увеличивается до 86 % от электропроводности меди. Средняя микротвердость увеличивается до 378 НВ.

Таблица 3. Сводные значения рентгенофазового анализа

Table 3. Summary values of X-ray phase analysis

Межплоскостное расстояние d, Å	Угол 2-Theta, град	Lin(Counts), ед	Интенсивность I, %
d=2,029	44,623	96,7	21,3
d=2,078	43,520	447	98,5
d=1,803	50,590	447	98,4
d=1,275	74,328	454	100
d=1,088	90,089	454	100
d=1,042	95,277	307	67,7
d=1,177	81,787	25,9	5,7

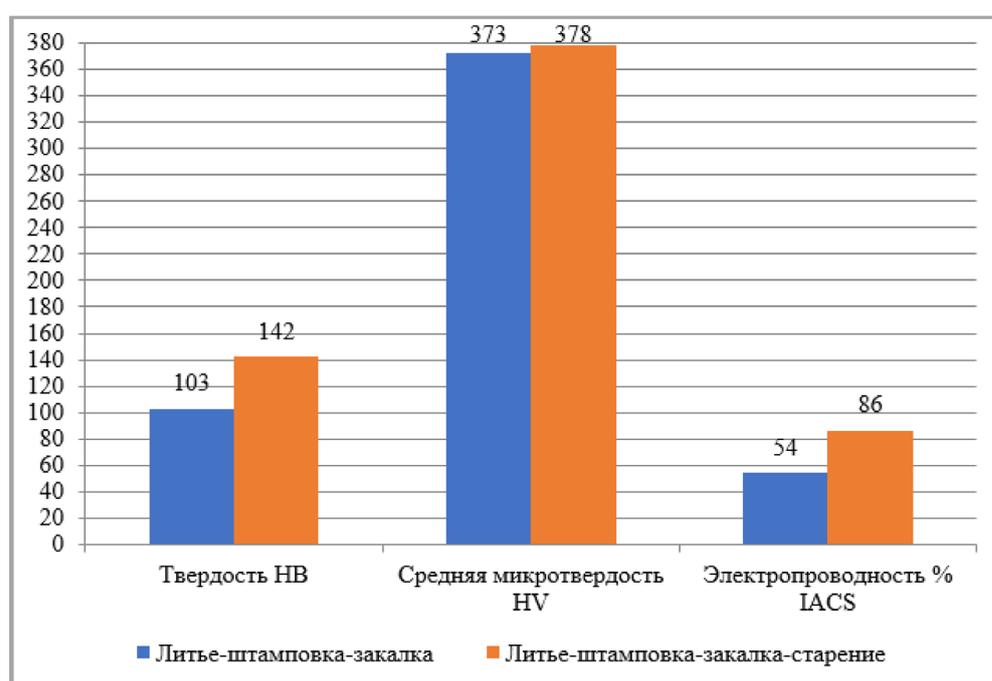


Рис. 12. Механические и электропроводные свойства композиционного материала

Fig. 12. Mechanical and electrically conductive properties of the composite material

### Заключение

1. Показано, что после обработки исходного порошка хрома в планетарно-центробежной мельнице наноразмерный порошок имеет размеры от 25 до 90 нм, среднее значение 54,6 нм, стандартное отклонение 16,6 нм, распределение размеров частиц несимметрично и описывается логарифмически-нормальным законом распределения.

2. Установлено, что в процессе обработки происходит механохимическая активация хрома, приводящая к повышению активности частиц за счет образования дефектов структуры, краевой угол смачивания медью наноразмерных частиц хрома при 1250 °C составляет 45°

и при дальнейшем повышении температуры плавно уменьшается, что приводит к увеличению седиментационной устойчивости наноразмерных частиц в расплаве.

3. Термодинамический анализ показывает, что фосфористая медь как раскислитель снижает содержание кислорода в расплаве меди перед введением наноразмерных частиц хрома.

4. Установлено, что равномерное распределение наноразмерных частиц хрома в расплаве достигается перемешиванием частотной модуляцией тока (в интервале 35–40 Гц от рабочей частоты) в переменном электромагнитном поле, позволяющем увеличивать седиментационную устойчивость наноразмерных частиц хрома в медном расплаве.

5. Предложена и подтверждена модель дисперсно-дисперсионного упрочнения наноразмерными частицами хрома в структурных изменениях композиционного материала с металлической матрицей на основе меди, построенная на гипотезе нечётких множеств: вводимые в расплав меди наноразмерные частицы хрома, не превышающие критического размера, соответствующего 50 % интегральной частоте (в данной работе до 54,6 нм), растворяются полностью, функция принадлежности  $\mu(x)=1$  или частично  $0<\mu(x)<1$  в расплаве медной матрицы, и переходят в  $\alpha$  твёрдый раствор с последующим выделением второй фазы при закалке и старении, а частицы большего размера  $\mu(x)=0$  выступают в качестве центров кристаллизации, способствуя формированию структуры сплава и обеспечивая дисперсное упрочнение.

6. Элементный состав поверхности образца электрода, показывает, что в процессе старения происходит выделение дисперсных частиц хрома, приводящих к снижению легированности  $\alpha$  твёрдого раствора, что приводит к увеличению твёрдости до 142 НВ, микротвёрдости до 378 НВ и удельной электропроводности до 86 % IACS.

Электронно-микроскопические исследования проведены в лаборатории электронной микроскопии Центра коллективного пользования СФУ.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы / References

[1] Yang F., Dong L., Zhou L., Zhang N., et al. Excellent strength and electrical conductivity achieved by optimizing the dual-phase structure in Cu–Fe wires. *Materials Science and Engineering*. 2022, 849, 143484. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143484>.

[2] Zeng W., Xie J., Zhou D., Fu Z., et al. Bulk Cu–NbC nanocomposites with high strength and high electrical conductivity. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018, 745, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.02.215>.

[3] Matthiessen A., Vogt C. IV. On the influence of temperature on the electric conducting–power of alloys. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1864, 154, 167–200. <https://doi.org/10.1098/rstl.1864.0004>.

[4] Hou J.P., Li R., Wang Q., Yu H.Y., et al. Breaking the trade-off relation of strength and electrical conductivity in pure Al wire by controlling texture and grain boundary. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018, 769, 96–109. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.07.358>.

[5] Brändli G., Olsen J.L. Size effects in electron transport in metals. *Materials Science and Engineering*. 1969, 4(2–3), 61–83. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(69\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0025-5416(69)90046-9).

[6] Sauvage X., Bobruk E. V., Murashkin M. Yu., Nasedkina Y., et al. Optimization of electrical conductivity and strength combination by structure design at the nanoscale in Al–Mg–Si alloys. *Acta Materialia*. 2015, 98, 355–366. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.07.039>.

[7] Лившиц Б. Г., Крапошин В. С., Липецкий Я. Л. *Физические свойства металлов и сплавов*. М.: Металлургия, 1980. 322 с. [Livshits B. G., Kraposhin V. S., Lipetsky Ya. L. *Physical properties of metals and alloys*. Moscow, Metallurgiiia, 1980, 322 p (in Russian)].

[8] Murashkin M. Y., Sabirov I., Sauvage X., et al. Nanostructured Al and Cu alloys with superior strength and electrical conductivity. *J Mater Sci*. 2016, 51, 33–49. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-9354-9>.

[9] Kasap S., Capper P. *Springer handbook of electronic and photonic materials*. New York: Springer, 2006. Vol. 11. 32 p.

[10] Andrews P. V., West M. B., Robeson C. R. The effect of grain boundaries on the electrical resistivity of polycrystalline copper and aluminium. *Philosophical Magazine*. 1969, 19(161), 887–898. <https://doi:10.1080/14786436908225855>.

[11] Koch S., Antrekowitsch H. Aluminum alloys for wiring harnesses in the automotive industry. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*. 2007, 152(2), 62–67. <https://doi.org/10.1007/s00501-007-0275-z>.

[12] Lu L., Shen Y., Chen X., Qian L., Lu K. Ultrahigh strength and high electrical conductivity in copper. *Science*. 2004, 304(5669), 422–426. <https://doi:10.1126/science.1092905>.

[13] Ширин В. Ф., Розенберг В. М., Белоусов Н. Н. Определение концентрации твёрдого раствора хромовой бронзы по величине удельного электросопротивления. *Известия РАН. Цветные металлы*, 1971, 12, 74. [Shirin V. F., Rozenberg V. M., Belousov N. N. Determination of the concentration of a chrome bronze solid solution based on the electrical resistivity value. *News of the Russian Academy of Sciences. Non-ferrous metals*, 1971, 12, 74 (In Rus.)].

[14] Sauvage X., Bobruk E. V., Murashkin M. Yu., Nasedkina Y., et al. Optimization of electrical conductivity and strength combination by structure design at the nanoscale in Al–Mg–Si alloys. *Acta Materialia*. 2015, 98, 355–366. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.07.039>.

[15] Unified numbering system (UNS) for Copper and Copper Alloys.

[16] Бусыгин С. Л., Токмин А. М., Довженко Н. Н., Казаков В. С. Влияние технологии изготовления на свойства электродов из хромистой бронзы для контактной рельефной сварки арматурных стержней. *Журнал СВУ. Техника и технологии*, 2021, 14(8), 914–929. [Busygin S. L., Tokmin A. M., Dovzhenko N. N., Kazakov V. S. The Influence of Manufacturing Technology on the Properties of Chromium-Bronze Electrodes for Contact Relief Welding of Reinforcing Rods. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2021, 14(8), 914–929 (In Rus.)] DOI: 10.17516/1999-494X-0368.

[17] Ерёмкина М. А., Ломаева С. Ф., Елсуков Е. П., Бодрова Л. Е., Гойда Э. Ю., Пастухов Э. А. Композиты Cu–карбид хрома, полученные с использованием механоактивации исходных компонентов в твердом и жидком состояниях. *Химическая физика и мезоскопия*, 2013, 15(2), 262–269. [Eremina M. A., Lomaeva S. F., Elsukov E. P., Bodrova L. E., Goyda E. Yu., Pastukhov E. A. Cu–chromium carbide composites obtained using mechanical activation of the initial components in solid and liquid states. *Chemical physics and mesoscopy*, 2013, 15(2), 262–269 (In Rus.)].

[18] Шурыгин П. М., Шантарин В. Д. Диффузия металлов в жидкой меди. *Физика металлов и металловедение*, 1963, 16(5), 731–736. [Shurygin P. M., Shantarin V. D. Diffusion of metals in liquid copper. *Physics of metals and metallurgy*, 1963, 16(5), 731–736 (In Rus.)].

[19] Курдюмов А. В., Белов В. Д. *Производство отливок из сплавов цветных металлов*. М.: МИСиС, 2011. 614 с. [Kurdyumov A. V., Belov V. D. *Production of castings from non-ferrous metal alloys*. Moscow, MISiS, 2011, 614 p (In Rus.)].

[20] Юров В. М. Температура плавления наночастиц чистых металлов. *Вестник Карагандинского университета. Серия Физика*, 2012, 3, 27–35. [Yurov V. M. Melting temperature of pure metal nanoparticles. *Bulletin of Karaganda University. Physics Series*, 2012, 3, 27–35 (In Rus.)].

[21] Busygin S. L., Tokmin A. M., Dementeva I. S., Kazakov V. S. The Heating Process in an Induction Crucible Furnace and the Technology of Chromium Bronze Smelting in Order to Obtain Resistance Welding Electrodes. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2018, 11(2), 148–154. [https://doi: 10.17516/1999-494X-0018](https://doi.org/10.17516/1999-494X-0018).

[22] Михеева Е. В., Пикула Н. П., Асташкина А. П. *Коллоидная химия*. Томск: ТПУ, 2013. 184 с. [Mikheeva E. V., Pikula N. P., Astashkina A. P. *Colloid chemistry*. Tomsk: TPU, 2013, 184 p. (In Rus.)].

[23] Салахова Р. К., Тюриков Е. В. Седиментационная устойчивость кластерных электролитов хромирования и роль наноразмерных частиц в процессе электроосаждения хромовых покрытий. *Журнал «Известия Самарского научного центра»*, 2013, 15(6), 88–93. [Salakhova R. K., Tyurikov E. V. Sedimentation stability of chromium plating cluster electrolytes and the role of nano-sized particles in the process of electrodeposition of chromium coatings. *Journal “News of the Samara Scientific Center”*, 2013, 15(6), 88–93 (In Rus.)].

[24] Batra I. S., Dey G. K., Kulkarni U. D., Banerjee S. Microstructure and properties of a Cu–Cr–Zr alloy. *Journal of Nuclear Materials*, 2001, 299(2), 91–100. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(01\)00691-2](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(01)00691-2).

[25] Casati R., Vedani M. Metal Matrix Composites Reinforced by Nano-Particles—A Review. *Metals*, 2014, 4(1), 65–83. <https://doi.org/10.3390/met4010065>.

[26] Осинцев О. Е., Федоров В. Н. *Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: Справочник*. М: Машиностроение, 2004, 336 с. [Osintsev O. E., Fedorov V. N. *Copper and copper alloys. Domestic and foreign brands: Directory*. Moscow, Mechanical engineering, 2004, 336 p. (In Rus.)].

[27] Николаев А. К., Новиков А. И., Розенберг В. М. *Хромовые бронзы*. М.: Металлургия, 1983. 176 с. [Nikolaev A. K., Novikov A. I., Rozenberg V. M. *Chromium bronze*. Moscow, Metallurgiiia, 1983, 176 p. (In Rus.)].

[28] Бусыгин С. Л. *Разработка технологии производства изделий из композиционного материала с металлической матрицей на основе меди и армирующими наноразмерными частицами хрома*, автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2023. 21 с. [Busygin S. L. *Development of technology for the production of products from a composite material with a copper-based metal matrix and reinforcing nano-sized chromium particles*, Thesis ... cand. of tech. Sci. Krasnoyarsk, 2023, 21 p. (In Rus.)].

[29] Грачев С. В., Бараз В. Р., Богатов А. А., Швейкин В. П. *Физическое материаловедение*. Екатеринбург: УрГТУ – УПИ, 2001. 534 с. [Grachev S. V., Baraz V. R., Bogatov A. A., Shveikin V. P. *Physical materials science*. Ekaterinburg: USTU – UPI, 2001, 534 p. (In Rus.)].

EDN: RIOHQO

УДК 623.373.8

## Method of Substantiation of the Algorithm of Detection of Multispectral Spontaneous Radiation and Assessment of Its Efficiency

Yuriy L. Koziratskiy<sup>a, b</sup>, Alexander A. Bolkunov<sup>c</sup>,  
Anton A. Koziratskiy<sup>c</sup> and Anton A. Barkalov<sup>b\*</sup>

*<sup>a</sup>Military Education and Research Centre of Military-Air Forces  
«Military-Air Academy Named After Professor N. E. Zhukovsky  
and Yu. A. Gagarin»*

*<sup>b</sup>Joint-Stock Company «Concert «Sozvezdie»*

*<sup>c</sup>Center for Systems Research and Development  
of the Branch of JSC “NTC REB”  
Voronezh, Russian Federation*

Received 04.03.2025, received in revised form 05.04.2025, accepted 09.04.2025

**Abstract.** Based on the use of methods of the theory of optimal reception of optical signals, an algorithm of operation of a multichannel receiver operating in the photoelectron counting mode (transition formation) is proposed, as applied to the detection of pre-generation multispectral spontaneous radiation of the transmitting laser channel. Using the procedure of functional transformation of random values of counts in the studied algorithm, conditional probabilities of correct detection and false alarm are obtained, characterizing the operation of a multichannel receiver when detecting multispectral pre-generation spontaneous radiation.

**Keywords:** detection algorithm, pre-generation multispectral spontaneous emission, algorithm efficiency, conditional probabilities of correct detection and false alarms, average values of signal (detectable) and noise photoelectrons (transition formation).

Citation: Koziratskiy Yu. L., Bolkunov A. A., Koziratskiy A. A., Barkalov A. A. Method of Substantiation of the Algorithm of Detection of Multispectral Spontaneous Radiation and Assessment of Its Efficiency. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(3), 409–418. EDN: RIOHQO



© Siberian Federal University. All rights reserved

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

\* Corresponding author E-mail address: barkalov\_anton\_a@mail.ru

## Методика обоснования алгоритма обнаружения многоспектрального спонтанного излучения и оценки его эффективности

Ю. Л. Козирацкий<sup>а, б</sup>, А. А. Болкунов<sup>в</sup>,  
А. А. Козирацкий<sup>в</sup>, А. А. Баркалов<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил  
«ВВА имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»

<sup>б</sup>Акционерное общество «Концерн «Созвездие»

<sup>в</sup>Центр системных исследований и разработок филиала АО «НТЦ РЭБ»  
Российская Федерация, Воронеж

**Аннотация.** На основе использования методов теории оптимального приема оптических сигналов предложен алгоритм работы многоканального приемника, работающего в режиме счета фотоэлектронов (образования переходов), применительно к обнаружению предгенерационного многоспектрального спонтанного излучения передающего лазерного канала. С использованием процедуры функционального преобразования случайных величин отсчетов в исследуемом алгоритме получены условные вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги, характеризующих работу многоканального приемника при обнаружении многоспектрального предгенерационного спонтанного излучения.

**Ключевые слова:** алгоритм обнаружения, предгенерационное многоспектральное спонтанное излучение, эффективность алгоритма, условные вероятности правильного обнаружения и ложных тревог, средние значения сигнальных (обнаруживаемых) и шумовых фотоэлектронов (образования переходов).

Цитирование: Козирацкий Ю. Л. Методика обоснования алгоритма обнаружения многоспектрального спонтанного излучения и оценки его эффективности / Ю. Л. Козирацкий, А. А. Болкунов, А. А. Козирацкий, А. А. Баркалов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(3). С. 409–418. EDN: R10HQO

### Введение

В ранее выполненных работах, в том числе с участием авторов [1–5], показано, что предгенерационное спонтанное излучение характеризуется широким и весьма неравномерным спектром. При этом с использованием терминологии зонной теории следует отметить, что большие значения амплитуд спонтанных излучений соответствуют длинам волн переходов, связанных с накачкой, последующими переходами до и после метастабильного уровня. На рис. 1 представлены типовые нормированные осциллограммы излучения лазера на AUG с неполным резонатором при переходе из метастабильного уровня.

Как следует из рис. 1, спонтанные излучения будут характеризоваться и существенной нестационарностью, связанной с ростом основных спектральных составляющих спонтанных излучений с течением времени, от момента включения системы оптической накачки до момента времени включения высокой добротности резонатора. На указанном интервале времени будет располагаться предгенерационное спонтанное излучение, которое представляет интерес в части формирования упреждающих действий, а также определения состояния лазерного средства при раздельном сопоставительном анализе спектральных составляющих спонтанных излу-

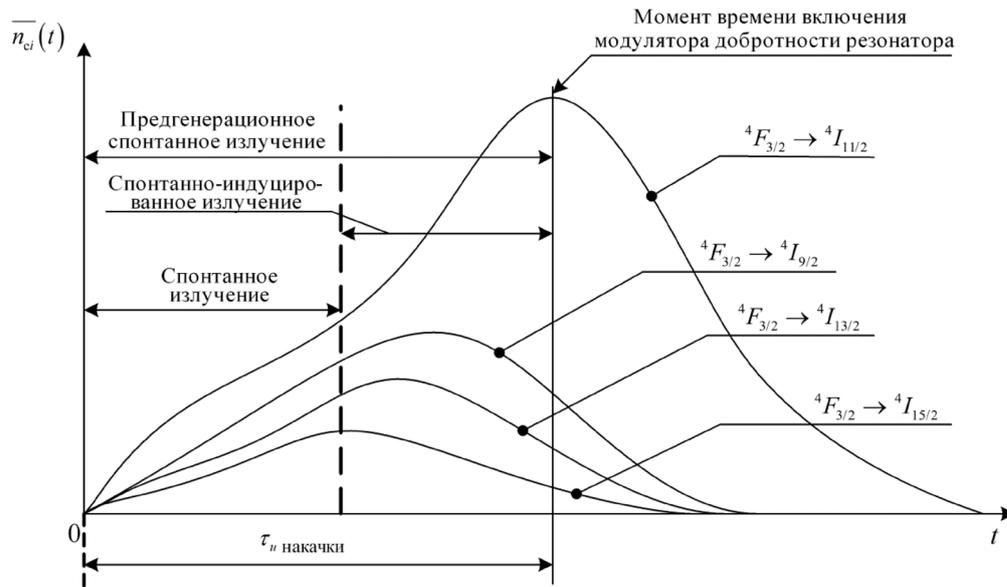


Рис. 1. Типовые осциллограммы изменения интенсивностей основных спонтанных излучений лазера на AUG во времени

Fig. 1. Typical oscillograms of changes in the intensities of the main spontaneous emissions of the AUG laser over time

чений, с учетом закономерностей относительных изменений их во времени. Во всех случаях рассматриваемые спонтанные излучения представляются как полезные сигналы, прошедшие через атмосферный канал, аддитивно вносящий фоновое излучение, турбулентные искажения, аэрозольное и молекулярное ослабление как мультипликативные составляющие помехи. Кроме того, необходимо учесть шумы, исходящие от исследуемых лазерных средств, а также внутренние шумы.

В связи с этим *целью настоящей статьи* является обоснование рационального способа и алгоритма обнаружения совокупности спонтанных излучений, а также каждой составляющей в зависимости от дальности в типовых атмосферных условиях.

### Описание процесса сигнального воздействия на вход многоканального приемника

Рассмотрим случай, когда каждая составляющая спонтанного излучения наблюдается в течение интервала времени  $T_M$ , который допускает разбиение на  $M$  одинаковых подынтервалов длительностью  $\tau_n$  так, что  $M\tau_n = T_M$ .

Как показано в [3–7], в общем случае в течение длительности подынтервала  $\tau_n$  интенсивность  $k$ -го спонтанно-индуцированного излучения в  $i$ -м подынтервале запишется в виде  $\gamma_{cki} (k = \overline{1, N}; i = \overline{1, M})$ .

Помеховая составляющая в каждом спектральном участке спонтанно-индуцированных излучений предполагается стационарной с постоянной интенсивностью  $\gamma_{шk}$ .

Решение принимается после последовательного накопления  $M$  отсчетов по каждому спектральному интервалу. В этом случае полагаем, что приемник в общем случае должен быть

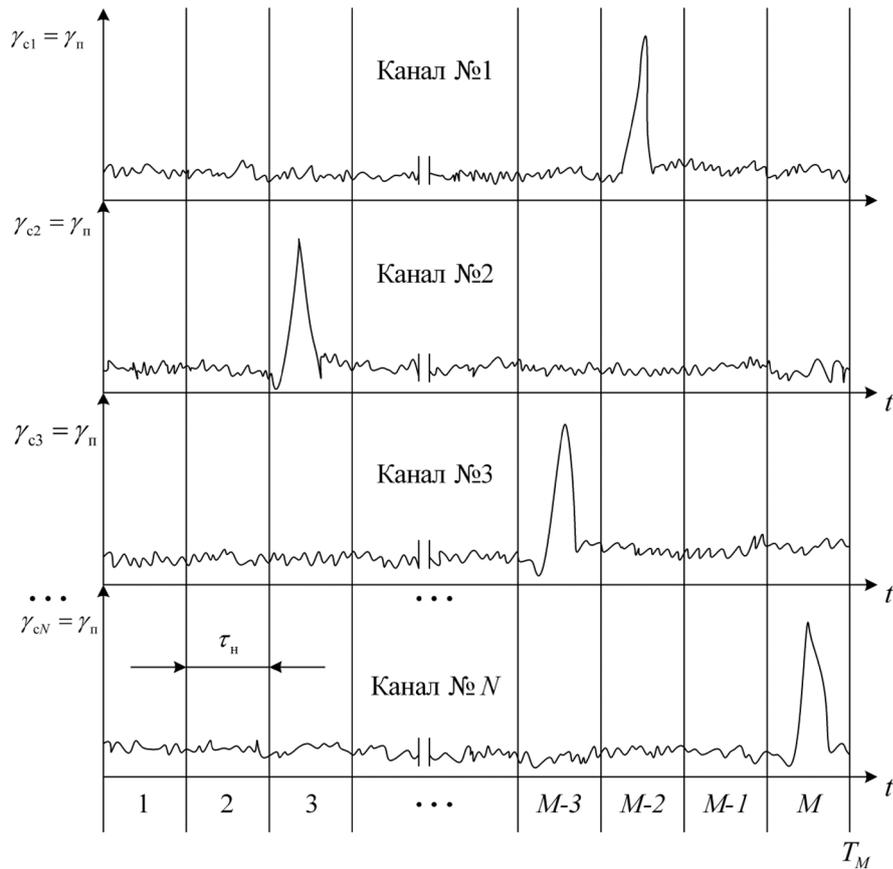


Рис. 2. Реализации входных воздействий поступающих на вход многоканальных приемников после частотного разделения

Fig. 2. Implementations of input signals arriving at the input of multichannel receivers after frequency division

многоканальным ( $N$  каналов), при этом в каждом канале наблюдается реализация длительностью  $T_M$  (рис. 2).

Для рассматриваемого случая, как показано в [7,8], в качестве оптимального приемника может рассматриваться приемник, работающий по правилу Неймана-Пирсона (с квантовым счетчиком в качестве чувствительного элемента).

При использовании указанного критерия выборка из реализации

$$\{n\} = n_{1,1}, n_{1,2}, \dots, n_{1,M}; n_{2,1}, n_{2,2}, \dots, n_{2,M}; \dots; n_{N,1}, n_{N,2}, \dots, n_{N,M}, \quad (1)$$

имеющаяся на входе приемника, отождествляется с наличием сигнала в том случае, если выполняется неравенство [6]

$$\lambda_k(\{n\}_k) = \frac{P_{1k}(\{n\}_k)}{P_{0k}(\{n\}_k)} \geq \lambda_{0k}, \quad (2)$$

или отождествляется с наличием шума, если  $\lambda_k < \lambda_{0k}$ , где  $P_{1k}(\{n\}_k)$  – совместная плотность вероятности для совокупности выборочных значений  $\{n\}_k$  в  $k$ -м канале при условии, что сигнал

присутствует;  $P_{0k}(\{n\}_k)$  – совместная плотность вероятности для той же совокупности выборочных значений в  $k$ -м канале при условии, что сигнала нет;  $\lambda_{0k}$  – пороговая величина, которая выбирается так, чтобы вероятность выполнения неравенства  $\lambda_k \geq \lambda_{0k}$ , при отсутствии сигнала была равна фиксированному значению  $F_{л.т.}$ .

Если выборочные значения статистически независимы, то многомерное отношение правдоподобно.

$$\lambda = \prod_{k=1}^N \prod_{i=1}^M \frac{P_{1k}(\{n_i\}_k)}{P_{0k}(\{n_i\}_k)}. \quad (3)$$

Как известно [7], критерии обнаружения удовлетворяющие другим условиям оптимальности, отличаются друг от друга лишь выбором величины  $\lambda_0$ . Критерий обнаружения Неймана-Пирсона соответствует условиям, когда число отсчетов в выборке фиксировано. Анализ выборочных значений осуществляется в процессе их поступления.

Алгоритм работы оптимального приемника определяется  $\lambda$ , а следовательно, видом плотностей  $P_{1k}(\{n_i\}_k)$  и  $P_{0k}(\{n_i\}_k)$ .

В случае слабых спонтанных сигналов и помехового излучения справедливы соотношения:

$$P_{1k}(\{n_i\}_k) = \prod_{k=1}^N \frac{(\bar{S}_{cki} + \bar{S}_{\phi k})^{n_{ik}}}{n_{ik}!} e^{-(\bar{S}_{cki} + \bar{S}_{\phi k})}, \quad (4)$$

$$P_{0k}(\{n_i\}_k) = \prod_{k=1}^N \frac{(\bar{S}_{\phi k})^{n_{ik}}}{n_{ik}!} e^{-\bar{S}_{\phi k}}, \quad (5)$$

где  $\bar{S}_{cki}$  – среднее число сигнальных фотоэлектронов, вызванных воздействием на фотоприемник  $k$ -го спонтанно-индуцированного излучения за время  $i$ -го отсчета;  $\bar{S}_{\phi k}$  – среднее число шумовых фотоэлектронов в  $k$ -м спектральном канале за время  $i$ -го отсчета.

Обозначим  $\bar{S}_{cki} = \gamma_{cki} \tau_n$ ;  $\bar{S}_{\phi k} = \gamma_{\phi k} \tau_n$ , где  $\gamma_{\phi k}$  – интенсивность потока шумовых фотоэлектронов.

Тогда, используя рекомендации, изложенные в [1], отношение правдоподобия и его логарифм при многоканальном обнаружении можно представить с помощью выражений:

$$\lambda = \prod_{i=1}^M \frac{(\bar{S}_{c1i} + \bar{S}_{\phi 1})^{n_{i1}}}{\bar{S}_{\phi 1}} e^{-\bar{S}_{c1i}} \dots \prod_{i=1}^M \frac{(\bar{S}_{cNi} + \bar{S}_{\phi N})^{n_{iN}}}{\bar{S}_{\phi N}} e^{-\bar{S}_{cNi}}, \quad (6)$$

$$\Lambda = \sum_{i=1}^M \left[ \sum_{k=1}^N n_{ik} \ln \frac{\bar{S}_{cki} + \bar{S}_{\phi k}}{\bar{S}_{\phi k}} - \sum_{k=1}^N \bar{S}_{cki} \right] = \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N [n_{ik} K_{ki} - \bar{S}_{cki}], \quad (7)$$

где  $K_{ki} = \ln \frac{\bar{S}_{cki} + \bar{S}_{\phi k}}{\bar{S}_{\phi k}}$ .

Структурная схема приемника, реализующая алгоритм, представленный выражением, будет иметь вид [1], изображенный на рис. 3.

Оптимальный обнаружитель (при использовании в приемнике  $N$  каналов, каждый из которых обеспечивает наилучшим образом преобразование спонтанно-индуцированного из-

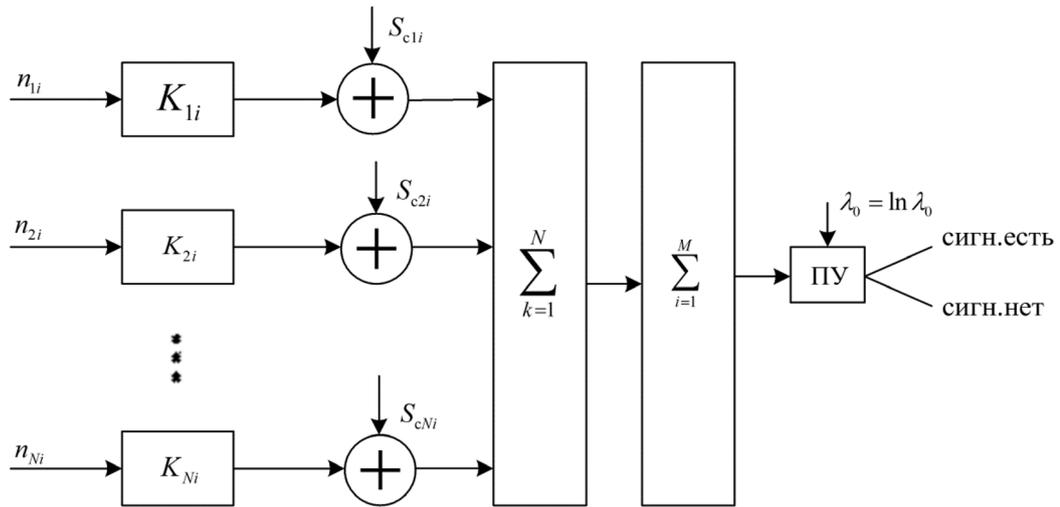


Рис. 3. Структурная схема оптимального приемника обнаружения спонтанно-индуцированного излучения

Fig. 3. Block diagram of an optimal receiver for detecting spontaneously induced emission

лучения в электрический сигнал) синтезирован с частично заданной структурой, в качестве которой рассматриваются эквивалентные схемы фотоприемников. Приемник (с учетом электронной части) должен в каждом  $k$ -м канале суммировать выборочное значение  $n_i(n_1, n_2, \dots, n_m)$ , умноженное на весовой коэффициент  $K_{ki}$ , и вычесть из произведенного средних значений  $\bar{S}_{cki}$ . Образованная сумма поступает на пороговое устройство и сравнивается с порогом  $\lambda_0 = \ln \lambda_0$ . Если сумма равна или превышает порог, принимается решение о присутствии в принятой смеси спонтанно-индуцированного излучения, в противном случае – об отсутствии в смеси искомого сигнала.

Приемник, осуществляющий решение на основании отношения правдоподобия, обладает наилучшей эффективностью и может служить в качестве стандарта для сравнения и выбора характеристик приемника [8].

### Оценка эффективности алгоритма приема предгенерационного многоспектрального спонтанного излучения передающего лазерного канала

Оценим эффективность алгоритма, представленного выражением. Для этого в качестве показателей будем использовать условные вероятности обнаружения  $P_{\text{обн}}$  и ложных тревог  $F_{\text{л.т.}}$ , для нахождения которых необходимо значение распределений вероятностей логарифма отношения правдоподобия  $\Lambda$  при наличии и отсутствии сигнала.

Обозначим  $f_c(\Lambda)$  и  $f_0(\Lambda)$  плотности вероятности величины  $\Lambda$  соответственно при наличии и отсутствии сигнала. В этом случае

$$P_{\text{обн}} = \int_{\Lambda_0}^{\infty} f_c(\Lambda) d\Lambda; \quad (8)$$

$$F_{\text{л.т.}} = \int_{\Lambda_0}^{\infty} f_0(\Lambda) d\Lambda. \quad (9)$$

Нахождение плотностей  $f_c(\Lambda)$  и  $f_0(\Lambda)$  при произвольных отношениях сигнал/шум представляет большие трудности.

Плотность вероятности  $\Lambda$  при отсутствии и наличии искомого сигнала описывается выражениями

$$f_0(\Lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Lambda_0}} e^{-\frac{(\Lambda-m_{\Lambda_0})^2}{2\sigma_{\Lambda_0}^2}}; \quad (10)$$

$$f_c(\Lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Lambda_c}} e^{-\frac{(\Lambda-m_{\Lambda_c})^2}{2\sigma_{\Lambda_c}^2}}. \quad (11)$$

где  $m_{\Lambda_{0(c)}}$  и  $\sigma_{\Lambda_{0(c)}}^2$  – математическое ожидание и дисперсия суммы при отсутствии и наличии сигнала.

$$\Lambda = \sum_{i=1}^M \left[ \sum_{k=1}^N n_{ik} \ln \frac{\bar{S}_{cki} + \bar{S}_{\phi k}}{\bar{S}_{\phi k}} - \sum_{k=1}^N \bar{S}_{cki} \right] = \sum_{i=1}^M \left[ n_i K_{\Sigma i} - \bar{S}_{c\Sigma i} \right] = \sum_{i=1}^M G_i; \quad (12)$$

где  $K_{\Sigma i} = \sum_{k=1}^N \ln \frac{\bar{S}_{ki} + \bar{S}_{\phi k}}{\bar{S}_{\phi k}}$  и  $\bar{S}_{c\Sigma i} = \sum_{k=1}^N \bar{S}_{cki}$ .

Полезный сигнал и помеха на входе имеют законы распределения Пуассона. Тогда распределения случайных величин  $n_{ik}$  будем считать известными (они определяются выражениями), тогда легко найти математическое ожидание  $\langle \xi_i \rangle$  и дисперсию  $\langle (\xi_i - \bar{\xi}_i)^2 \rangle$  функции этой случайной величины  $\xi_i = n_i K_{ki} - \bar{S}_{c\Sigma i}$  при отсутствии и наличии сигнала.

Для первого канала

$$\xi_i = n_i K_{1i} - \bar{S}_{c1i}; \quad (13)$$

$$\bar{\xi}_{10} = \bar{S}_{\phi 1} K_{1i} - \bar{S}_{c1i}; \bar{\xi}_{11} = (\bar{S}_{c1i} + S_{\phi 1}) K_{1i} - \bar{S}_{c1i}; \quad (14)$$

$$\langle (\xi_i - \bar{\xi}_{10})^2 \rangle = K_{1i}^2 \bar{S}_{\phi 1}; \langle (\xi_i - \bar{\xi}_{11})^2 \rangle = K_{1i}^2 (\bar{S}_{c1i} + S_{\phi 1}) \quad (15)$$

Поступая аналогично для остальных каналов, учитывая статистическую независимость слагаемых при суммировании по каналам  $i$ -го отсчета, находим:

$$G_i = \sum_{k=1}^N \left[ n_{ik} K_{ik} - \bar{S}_{cki} \right]; \quad (16)$$

$$G_{0i} = \sum_{k=1}^N \left[ \bar{S}_{\phi k} K_{ik} - \bar{S}_{cki} \right]; \quad (17)$$

$$\bar{G}_{1i} = \sum_{k=1}^N \left[ (\bar{S}_{cki} + \bar{S}_{\phi k}) K_{ik} - \bar{S}_{cki} \right]; \quad (18)$$

$$\sigma_{G0i}^2 = \sum_{k=1}^N \bar{S}_{\phi k} K_{ki}^2, \quad (19)$$

$$\sigma_{G1i}^2 = \sum_{k=1}^N (\bar{S}_{cki} + \bar{S}_{\phi k}) K_{ki}^2. \quad (20)$$

Учет суммирования по времени дает

$$m_{\Lambda_0} = \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N [\bar{S}_{\phi k} K_{ki} - \bar{S}_{cki}]; m_{\Lambda_1} = \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N [(\bar{S}_{cki} + \bar{S}_{\phi k}) K_{ki} - \bar{S}_{cki}] \quad (21)$$

$$\sigma_{\Lambda_0}^2 = \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N \bar{S}_{\phi k} K_{ki}^2; \sigma_{\Lambda_1}^2 = \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N (\bar{S}_{cki} + \bar{S}_{\phi k}) K_{ki}^2. \quad (22)$$

Используя и, находим:

$$F_{\text{л.т.}} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \Phi \left\{ \frac{\Lambda_0 - \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N (\bar{S}_{\phi k} K_{ki} - \bar{S}_{cki})}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N \bar{S}_{\phi k} K_{ki}^2}} \right\} \right]; \quad (23)$$

$$P_{\text{обн}} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \Phi \left\{ \frac{\Phi^{-1}(1 - 2F_{\text{л.т.}}) \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N \bar{S}_{\phi k} K_{ki}^2 - \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N \bar{S}_{cki} K_{ki}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N (\bar{S}_{cki} + \bar{S}_{\phi k}) K_{ki}^2}} \right\} \right] \quad (24)$$

где  $N$  – количество каналов ( $k$ );  $M$  – количество отсчетов ( $i$ );  $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ ;

$$\Phi^{-1}[\Phi(x)] = x.$$

В табл. 1 указаны значения  $\bar{S}_{cki}$ .

Среднее число шумовых фотоэлектронов в  $k$ -м спектральном канале за время  $i$ -го отсчета равно 3 ( $\bar{S}_{\phi k} = 3$ ).

Таблица 1. Значения среднего числа сигнальных фотоэлектронов, вызванных воздействием на фотоприемник  $k$ -го спонтанно-индуцированного излучения за время  $i$ -го отсчета

Table 1. Values of the average number of signal photoelectrons caused by the action of the  $k$ -th spontaneously induced radiation on the photodetector during the  $i$ -th count

$\bar{S}_{cki}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\bar{S}_{c1}$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\bar{S}_{c2}$	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5
$\bar{S}_{c3}$	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25
$\bar{S}_{c4}$	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3

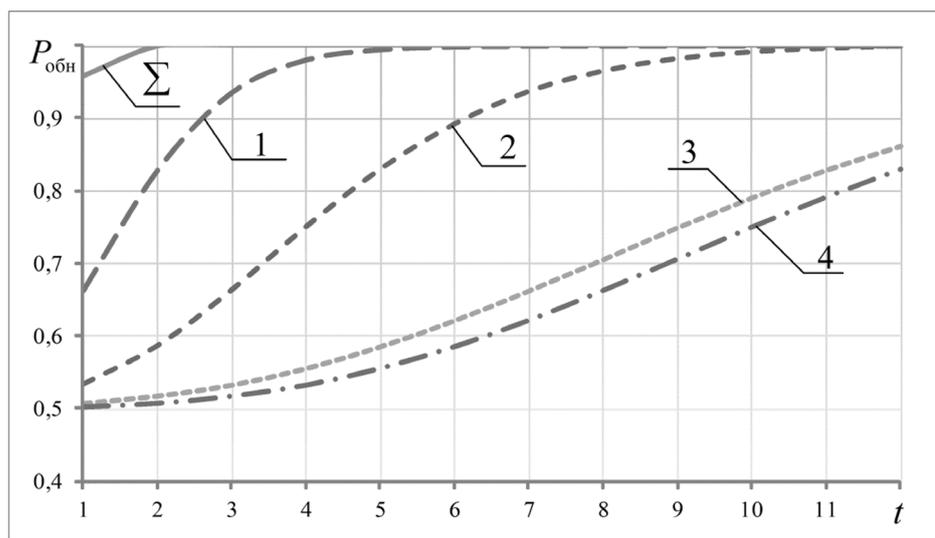


Рис. 4. Графики вероятности обнаружения в смеси сигнала спонтанно-индуцированного излучения суммарного и поканально

Fig. 4. Graphs of the probability of detection in a mixture of a signal of spontaneously induced emission of the total and channel-by-channel

С помощью исходных данных получим следующие результаты (рис. 4):

#### Заключение

При анализе полученных результатов можно сделать вывод, что при вероятности ложной тревоги ( $F_{л.т.}$ ), равной  $10^{-4}$ , с вероятностью, близкой к единице, принятие решения о присутствии в принятой смеси сигнала спонтанно-индуцированного излучения ( $P_{обн}$ ) будет возможным на втором отсчете.

Полученные результаты показывают, принятие решения о присутствии в принятой смеси сигнала спонтанно-индуцированного излучения ( $P_{обн}$ ) поканально будет возможно с вероятностью, близкой к единице, в первом канале после 5 отсчета, во втором канале – после 10 отсчетов, а в третьем и четвертом каналах – после 12 отсчетов.

Полученные зависимости подтверждают возможность эффективно принимать решение о наличии или отсутствии в принятом сигнале спонтанно-индуцированного излучения. Решена задача обоснования рационального способа и алгоритма обнаружения совокупности спонтанных излучений, а также каждой составляющей в зависимости от дальности в типовых атмосферных условиях.

#### Список литературы / References

- [1] Козирацкий Ю.Л., Афанасьева Е.М., Гревцев А.И., Донцов А.А., Иванцов А.В., Козирацкий А.Ю., Кулешов П.Е., Кусакин А.В., Паринов М.Л., Попело В.Д., Прохоров Д.В. Обнаружение и координатометрия оптико-электронных средств, оценка параметров их сигналов, М.: *Радиотехника*, 2013. 456 с. [Koziratskiy Yu.L., Afanasyeva E.M., Grevtsev A.I., Dontsov A.A., Ivantsov A.V., Koziratskiy A. Yu., Kuleshov P.E., Kusakina A.V., Parinov M.L., Popelo V.D.,

Prokhorov D. V. Detection and coordinateometry of optical-electronic devices, assessment of the parameters of their signals, M.: *Radiotekhnika*, 2013. 456 p. (In Rus.)]

[2] Козирацкий Ю.Л., Прохоров Д.В. Компьютерная модель передающего лазерного средства в предгенерационном режиме функционирования. *Воздушно-космические силы. Теория и практика*. № 12. 2019. С. 233–242. [Koziratsky Yu.L., Prokhorov D. V. Computer model of a transmitting laser device in the pre-generation mode of operation. *Vozdushno-kosmicheskiye sily. Teoriya i praktika*. 12. 2019. 233–242. (In Rus.)]

[3] Козирацкий Ю.Л., Меркулов Р.Е., Кох Н.С. Обоснование принципов построения малогабаритной бортовой станции формирования упреждающих помех лазерным системам управления огнем зенитно-артиллерийского комплекса. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2018. Т. 11. № 1. С. 6–15. [Koziratsky Yu.L., Merkulov R.E., Kokh N. S. Justification of the principles of constructing a small-sized onboard station for generating preemptive interference for laser fire control systems of an anti-aircraft artillery complex. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*. 2018. 11. 1. 6–15. (In Rus.)]

[4] Козирацкий Ю.Л., Глушков А.Н., Меркулов Р.Е. Адаптивное управление моментом излучения лазерной энергии при подавлении оптико-электронных средств. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2019. Т. 12. № 1. С. 81–87. [Koziratsky Yu.L., Glushkov A. N., Merkulov R. E. Adaptive control of the moment of laser energy emission during suppression of optoelectronic means. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*. 2019. 12. 1. 81–87. (In Rus.)]

[5] Козирацкий Ю.Л., Донцов А.А., Калачев В.В., Левшин Е.А. Оценка эффективности деструктивных воздействий на лазерные системы наведения высокоточного оружия. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2020. Т. 13. № 7. С. 855–870. [Koziratsky Yu.L., Dontsov A. A., Kalachev V. V., Levshin E. A. Evaluation of the effectiveness of destructive effects on laser guidance systems of high-precision weapons. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*. 2020. 13. 7. 855–870. (In Rus.)]

[6] Шереметьев А.Г. *Статистическая теория лазерной связи*. М.: Связь, 1971. 264 с. [Sheremetyev A. G. *Statistical theory of laser communication*. Moscow: Svyaz, 1971. 264 p. (In Rus.)]

[7] Курикша А.А. *Квантовая оптика и оптическая локация*. М.: Советское радио. 1973. 134 с. [Kuriksha A. A. *Quantum optics and optical location*. M.: Sovetskoye radio. 1973. 134 p. (In Rus.)]

[8] Тихонов В.И. *Оптимальный прием сигналов*. М. Радио и связь. 1983. 320 с. [Tikhonov V. I. *Optimal reception of signals*. M. Radio i svyaz'. 1983. 320 p. (In Rus.)]

EDN: YKHDCO

УДК 623.373

## Analysis of Massive MIMO System Performance in Rician Fading Channel

Muhanned AL-Rawi\*

*Bandung Institute of Technology  
Indonesia, Bandung*

Received 30.01.2025, received in revised form 04.02.2025, accepted 09.04.2025

**Abstract.** This review paper studies the performance of massive MIMO uplink system over Rician fading channel. The performance is measured in terms of spectral efficiency versus number of base station antennas using three schemes of linear detection, maximum-ratio-combining (MRC), zero forcing receiver (ZF), and minimum mean-square error receiver (MMSE). The simulation results show that the spectral efficiency increases significantly with increasing the number of base station antennas. Also, the spectral efficiency with MMSE is better than that with ZF, and the latter is better than that with MRC. In addition, the spectral efficiency decreases with increasing the fading parameter.

**Keywords:** Massive MIMO, Rician fading channel.

Citation: Muhanned AL-Rawi. Analysis of Massive MIMO System Performance in Rician Fading Channel. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(3), 419–426. EDN: YKHDCO



## Анализ производительности системы Massive MIMO в канале с замираниями Райса

Муханнед Аль-Раби

*Бандунгский технологический институт  
Бандунг, Индонезия*

**Аннотация.** В данном обзоре рассматривается производительность массивной MIMO-системы восходящей линии связи в канале с замираниями Райса. Производительность измеряется с точки зрения спектральной эффективности в зависимости от количества антенн базовой станции

© 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: muhrawi@yahoo.com

с использованием трех схем линейного обнаружения, объединения максимального отношения (MRC), приемника с нулевой форсировкой (ZF) и приемника с минимальной среднеквадратичной ошибкой (MMSE). Результаты моделирования показывают, что спектральная эффективность значительно увеличивается с ростом числа антенн базовой станции. Кроме того, спектральная эффективность при использовании MMSE выше, чем при применении ZF, а при использовании MRC – выше, чем при использовании MMSE. Кроме того, спектральная эффективность снижается с увеличением параметра замираний.

**Ключевые слова:** массивный MIMO, канал с рванскими замираниями.

Цитирование: Муханнед Аль-Раби. Анализ производительности системы Massive MIMO в канале с замираниями Райса / Муханнед Аль-Раби // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(3). С. 419–426. EDN: YKHDGO

## Introduction

Multiple Input Multiple Output (MIMO) technology is a point-to-point communication links with multiple antennas at both the transmitter and receiver. The use of multiple antennas at both transmitter and receiver clearly provide an improvements on *data rate*, because the more antennas, the more independent data streams can be sent out; an improvements on *reliability*, because the more antennas, the more possible paths that the radio signal can propagate over, and an improvements on *energy efficiency*, because the base station can focus its emitted energy into the spatial directions where it knows that the terminals are located.

An enhanced form of point-to-point MIMO technology is multiuser MIMO (MU-MIMO) which enables multiple independent radio terminals to access a system enhancing the communication capabilities of each individual terminal. MU-MIMO differs from point-to-point MIMO in two respects: first, the terminals are typically separated by many wavelengths, and second, the terminals cannot collaborate among themselves, either to transmit or to receive data.

Nowadays, MU-MIMO systems are used in a new generation wireless technologies. Due to that wireless technology improvement is ongoing, the numbers of users and applications increase rapidly. Then, wireless communications need the high data rate and link reliability at the same time. Therefore, MU-MIMO improvements have to consider 1) providing the high data rate and link reliability, 2) support all users in the same time and frequency resource, and 3) using low power consumption. In practice, the interuser interference has a strong impact when more users access to the wireless link. Complicated transmission techniques such as interference cancellation should be used to maintain a given desired quality of service. Due to these problems, MU-MIMO with very large antenna arrays (known as massive MIMO) are proposed [1–10]. With a massive MU-MIMO system, we mean a hundred of antennas or more serving tens of users. The channel vectors are nearly orthogonal, and then the interuser interference is reduced significantly. Therefore, the users can be served with high data rate simultaneously

## 1. System Model

The model of massive MIMO system considered here consists of uplink system model, channel model(Rician fading channel), and linear detection schemes. These three parts are discussed in details in the next sections.

### 1.1. Uplink System Model

A single-cell uplink system is considered here, where there are  $K$  mobile users and one base station (BS). Each user has one transmit antenna, and the BS has  $M$  receive antennas as shown in Fig. 1. The received signal at the BS is

$$\mathbf{y} = \sqrt{p_u} \sum_{k=1}^K \mathbf{h}_k x_k + \mathbf{n}, \quad (1)$$

$$\mathbf{y} = \sqrt{p_u} \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (2)$$

where  $\sqrt{p_u} x_k$  is the transmitted signal from the  $k$ th user (the average power transmitted by each user is  $p_u$ ),  $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  is the channel vector between the  $k$ th user and the BS,  $\mathbf{n} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  is the additive noise vector,  $\mathbf{H} \triangleq [\mathbf{h}_1 \ \dots \ \mathbf{h}_K]$  is channel matrix given below, and  $\mathbf{x} \triangleq [x_1 \ \dots \ x_K]^T$ . It is assumed that the elements of  $\mathbf{h}_k$  and  $\mathbf{n}$  are (independent identically distribution) i.i.d. Gaussian distributed with zero mean and unit variance.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1K} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M1} & h_{M2} & \dots & h_{MK} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

The BS will coherently detect the signals transmitted from  $K$  users by using the received signal vector  $\mathbf{y}$  together with knowledge of the channel state information (CSI). This CSI has to be estimated. The channel estimate can be obtained from uplink training.

It is assumed that the channel stays constant over  $T$  symbol durations. During each coherence interval, there are two phases (see Fig. 2). In the first phase, a part  $\tau$  of the coherence interval is used for uplink training to estimate the channel of each user. In the second phase, all  $K$  users simultaneously transmit their data to the BS. The BS then detects the transmitted signals using the channel estimates acquired in the first phase.

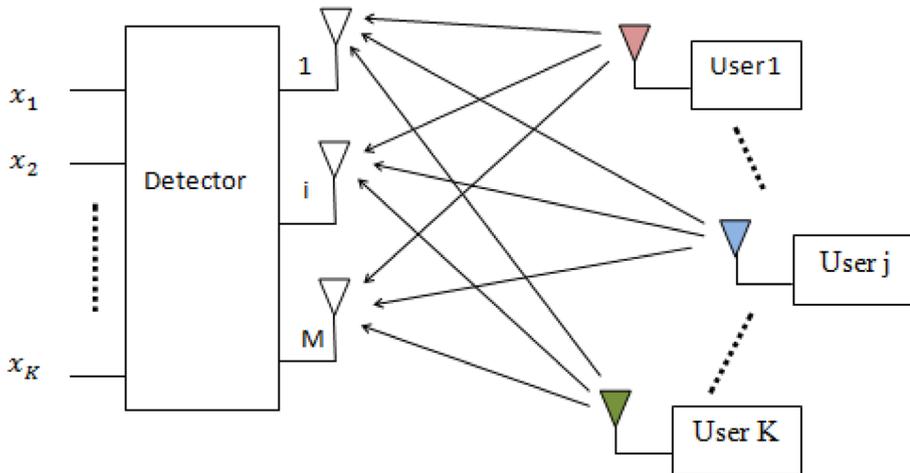


Fig. 1. Massive MIMO uplink system model

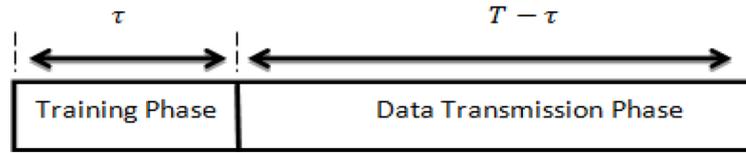


Fig. 2. Uplink transmission protocol

## 1.2. Rician Fading Channel

A probability density function of the signal received in the line-of-sight(LOS) environment follows the Rician distribution. In the LOS environment where there exists a strong path which is not subject to any loss due to reflection, diffraction, and scattering, the amplitude of the received signal can be expressed as  $X = a + W1 + jW2$  where  $a$  represents the LOS component, while,  $W1$  and  $W2$  are the i.i.d. Gaussian random variables with a zero mean and variance of  $\sigma^2$  as in the non-LOS environment. It has been known that  $X$  is the Rician random variable. Then, the channel coefficient of Rician fading channel is given by

$$h_{Rician} = a + c + jd, \quad (4)$$

where  $a = \sqrt{\frac{\mathcal{K}}{\mathcal{K} + 1}}$ ,  $c \sim \mathcal{N}\left(0, \frac{1}{2(\mathcal{K} + 1)}\right)$ ,  $d \sim \mathcal{N}\left(0, \frac{1}{2(\mathcal{K} + 1)}\right)$ , and  $\mathcal{K}$  is the ratio of the power in the LOS

component to the power in the other (non-LOS) multipath components.

The fading parameter  $\mathcal{K}$  which is usually given in dB is a measure of the severity of the fading, a small  $\mathcal{K}$  implies severe fading, while, a large  $\mathcal{K}$  implies milder fading.

## 1.3. Linear detection

To obtain optimal performance, the maximum likelihood(ML) multiuser detection can be used by the BS to detect all signals transmitted from  $k$  user, assuming that the BS has perfect CSI knowledge. The complexity of ML is high, so the BS can use linear detection schemes to reduce the decoding complexity. However, these schemes have lower detection reliability compared with ML detection but when the number of BS antennas is large, linear detectors are nearly-optimal. Three schemes of linear detection are considered, maximum-ratio combining(MRC), zero-forcing receiver(ZF), and minimum mean-square error receiver(MMSE) as described below.

### 1.3.1. Maximum-Ratio Combining(MRC)

With MRC, the BS maximizes the received signal-to-noise ratio (SNR) of each stream, ignoring the effect of multiuser interference. As a result, to detect the transmitted signal from the  $k$ -th user, the received signal  $\mathbf{y}$  is multiplied by the conjugate-transpose of the channel vector  $\mathbf{h}_k$ , as follows

$$\tilde{\mathbf{y}}_k = \mathbf{h}_k^H \mathbf{y} = \sqrt{p_u} \|\mathbf{h}_k\|^2 x_k + \sqrt{p_u} \sum_{i \neq k}^K \mathbf{h}_k^H \mathbf{h}_i x_i + \mathbf{h}_k^H \mathbf{n}. \quad (5)$$

The received signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR) of the  $k$ th stream for MRC is given by

$$SINR_{mrc,k} = \frac{p_u \|\mathbf{h}_k\|^4}{p_u \sum_{i \neq k}^K |\mathbf{h}_k^H \mathbf{h}_i|^2 + \|\mathbf{h}_k\|^2}. \quad (6)$$

The achievable rate of  $k$ th user with MRC is given by

$$\mathbf{R}_k^{MRC} = \log_2 \left( 1 + \frac{p_u \|\mathbf{h}_k\|^4}{p_u \sum_{i \neq k}^K |\mathbf{h}_k^H \mathbf{h}_i|^2 + \|\mathbf{h}_k\|^2} \right). \quad (7)$$

Hence the spectral efficiency with MRC is given by

$$\mathbf{R}^{MRC} = K * \mathbf{R}_k^{MRC} = K * \log_2 \left( 1 + \frac{p_u \|\mathbf{h}_k\|^4}{p_u \sum_{i \neq k}^K |\mathbf{h}_k^H \mathbf{h}_i|^2 + \|\mathbf{h}_k\|^2} \right). \quad (8)$$

MRC is a very simple signal processing since the BS just multiplies the received vector with the conjugate-transpose of the channel matrix  $\mathbf{H}$ , and then detects each stream separately. More importantly, MRC can be implemented in a distributed manner. In addition, MRC can achieve the same array gain as in the case of a single-user system at low SNR, but MRC performs poorly in interference-limited scenarios because it neglects the effect of multiuser interference.

### 1.3.2. Zero-Forcing Receiver (ZF)

In contrast to MRC, zero-forcing receivers (ZF) take the interuser interference into account, but neglect the effect of noise. With ZF, the multiuser interference is completely nulled out by projecting each stream onto the orthogonal space of the interuser interference. More precisely, the received vector is multiplied by the pseudo-inverse of the channel matrix  $\mathbf{H}$  as

$$\tilde{\mathbf{y}} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{y} = \sqrt{p_u} \mathbf{x} + (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{n}. \quad (9)$$

The received SINR of the  $k$ th stream is given by

$$SINR_{zf,k} = \frac{p_u}{[(\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1}]_{kk}}. \quad (10)$$

The achievable rate of  $k$ th user with ZF is given by

$$\mathbf{R}_k^{ZF} = \log_2 \left( 1 + \frac{p_u}{[(\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1}]_{kk}} \right). \quad (11)$$

Hence the spectral efficiency with ZF is given by

$$\mathbf{R}^{ZF} = K * \mathbf{R}_k^{ZF} = K * \log_2 \left( 1 + \frac{p_u}{[(\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1}]_{kk}} \right). \quad (12)$$

ZF is a simple signal processing and works well in interference-limited scenarios, but since ZF neglects the effect of noise, it works poorly under noise-limited scenarios. Compared with MRC, ZF has a higher implementation complexity due to the computation of the pseudo-inverse of the channel gain matrix.

### 1.3.3. Minimum Mean-Square Error Receiver(MMSE)

It is known that the MMSE receiver maximizes the received SINR. Therefore, among the MMSE, ZF, and MRC receivers, MMSE is the best, the received SINR for the MMSE receiver is given by

$$SINR_{mmse,k} = p_u \mathbf{h}_k^H \left( p_u \sum_{i \neq k}^K \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H + \mathbf{I}_M \right)^{-1} \mathbf{h}_k. \quad (13)$$

The achievable rate of  $k$ th user with MMSE is given by

$$\mathbf{R}_k^{MMSE} = \log_2 \left( 1 + p_u \mathbf{h}_k^H \left( p_u \sum_{i \neq k}^K \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H + \mathbf{I}_M \right)^{-1} \mathbf{h}_k \right). \quad (14)$$

Hence the spectral efficiency with MMSE is given by

$$\mathbf{R}^{MMSE} = K * \mathbf{R}_k^{MMSE} = K * \log_2 \left( 1 + p_u \mathbf{h}_k^H \left( p_u \sum_{i \neq k}^K \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H + \mathbf{I}_M \right)^{-1} \mathbf{h}_k \right). \quad (15)$$

Where  $\mathbf{I}_M$  is the identity matrix of size  $M$

## 2. Simulation Results

A series of computer simulation tests are carried out to study the system performance. The performance is measured by drawing the spectral efficiency versus the number of BS antennas using MRC, ZF, and MMSE. The number of users is chosen to be  $K = 2$  and  $\mathcal{K} = 0\text{dB} \& -40\text{dB}$ . Furthermore, the SNR is set at 0 dB. Fig. 3 and Fig. 4 show that the spectral efficiency increases as the number of BS antennas increases for  $\mathcal{K} = 0\text{dB} \& -40\text{dB}$  respectively. Also, the spectral efficiency with MMSE is better than that with ZF, and the latter is better than that with MRC for  $\mathcal{K} = 0\text{dB} \& -40\text{dB}$ . Furthermore, by comparing between Fig. 3 and Fig. 4, it can be concluded that the spectral efficiency for  $\mathcal{K} = -40\text{dB}$  is better than the spectral efficiency for  $\mathcal{K} = 0\text{dB}$ .

## Conclusion

The performance of massive MIMO uplink system was measured over Rician fading channel, using MRC, ZF, and MMSE linear detection schemes. The results show that the performance improved significantly with increasing the number of BS antennas for different values of  $\mathcal{K}$ . Also, the performance with MMSE is better than that with ZF and the latter is better than that with MRC for different values of  $\mathcal{K}$ . Furthermore, as  $\mathcal{K}$  increases, the spectral efficiency decreases.

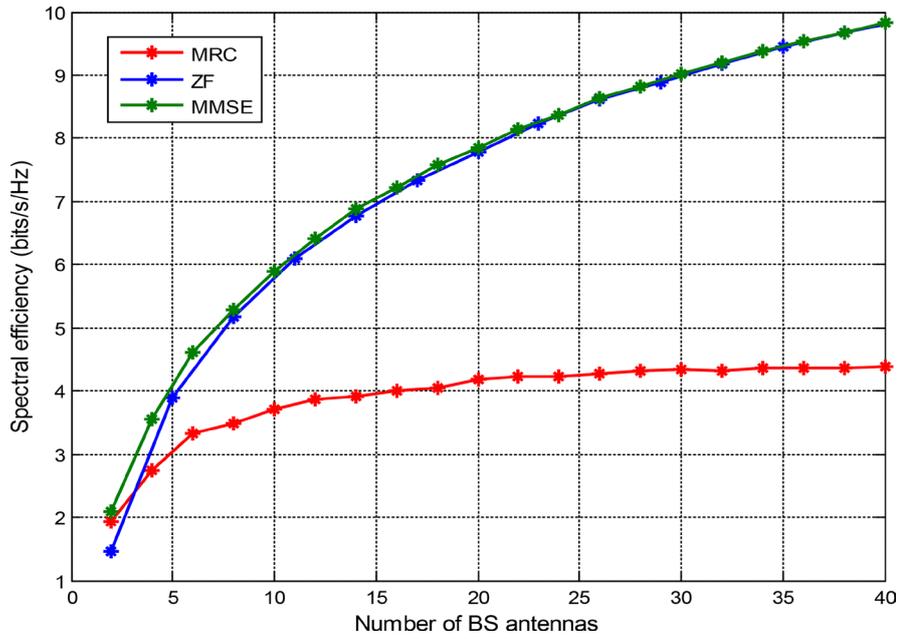


Fig. 3. The spectral efficiency versus the number of BS antennas for MRC, ZF, MMSE, and  $\mathcal{K} = 0\text{dB}$

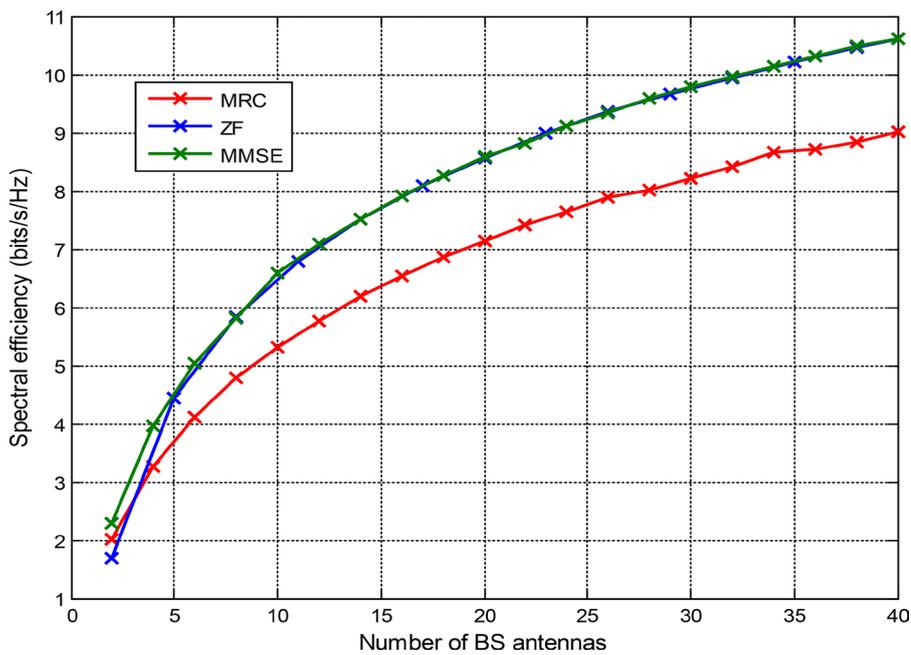


Fig. 4. The spectral efficiency versus the number of BS antennas for MRC, ZF, MMSE and  $\mathcal{K} = -40\text{dB}$

## References

- [1] Marzetta T.L. Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Number of Base Station Antennas. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 9(11).
- [2] Ngo H.Q. *Performance Bounds for Very Large Multiuser MIMO Systems*. M. Sc. Thesis, Linköping University, Sweden, 2012.
- [3] Huh H., Caire G., Papadopoulos H.C., and Ramprasad S.A. Achieving ‘Massive MIMO’ Spectral Efficiency with a Not-So-Large Number of Antennas. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(9).
- [4] Hoydis J., ten Brink S., and Debbah M. Massive MIMO in the UL/DL of Cellular Networks: How Many Antennas Do We Need? *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(2).
- [5] Ngo H. Q., Larsson E. G., and Marzetta T.L. Energy and Spectral Efficiency of Very Large Multiuser MIMO Systems. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(4).
- [6] Pakdeejit E. *Linear Precoding Performance of Massive MU-MIMO Downlink System*. M. Sc. Thesis, Linköping University, Sweden, 2013.
- [7] Lu L., Li G. Y., Swindlehurst A. L., Ashikhmin A., and Zhang R. An Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2014, 8(5).
- [8] Andrews J. G., Buzzi S., Choi W., Hanly S., Lozano A., Soong A. C. K., and Zhang J. C., What Will 5G Be? *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(6).
- [9] Ali M. et al. *Massive MIMO for Fifth Generation Wireless System*. B. Sc. Project, University of Ibb, Yemen, 2014.
- [10] Ngo H.Q. *Massive MIMO: Fundamental and System Design*. Dissertation. Linköping University, Sweden, 2015.

**Information and  
Communication  
Technologies**

**Информационно-  
коммуникационные  
технологии**



EDN: YMTKME

УДК 629.124

## Maximum Likelihood Method Application to Signal Processing in Digital Information Exchange Systems

Sergey V. Shostak<sup>a</sup>,  
Alexander V. Bengard<sup>a</sup>, Evgeny F. Sverdlov<sup>a</sup>,  
Grigory V. Dorofeev<sup>\*b</sup> and Pavel A. Starodubtsev<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Far Eastern Federal University

<sup>b</sup>Pacific Higher Naval School named after S. O. Makarov  
Vladivostok, Russian Federation

Received 09.02.2025, received in revised form 10.02.2025, accepted 09.04.2025

**Abstract.** This article describes the digital communication systems relevance and the signal manipulation role in these systems. It is noted that the problem of determining the received signal in such systems is considered as the problem of determining the estimates of the modulated signal parameters. The solution of such a problem is considered based on a signal with quadrature manipulation. Using the Rao-Kramer theorem, the calculation of the estimates of the parameters of the received signal is derived. The processing of such a signal in real conditions, in situations where the noise is colored, is also explained.

**Keywords:** digital communication systems, manipulation, signal parameter estimation, Rao-Kramer theorem, maximum likelihood method.

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

Citation: Shostak S. V., Bengard A. V., Sverdlov E. F., Dorofeev G. V., Starodubtsev P. A. Maximum Likelihood Method Application to Signal Processing in Digital Information Exchange Systems. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(3), 428–434. EDN: YMTKME



© 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: grigory\_artem\_007@mail.ru; servash@mail.ru

## Применение метода максимального правдоподобия для обработки сигналов в цифровых системах обмена информацией

С. В. Шостак<sup>а</sup>, А. В. Бенгард<sup>а</sup>,  
Е. А. Свердлов<sup>а</sup>, Г. В. Дорофеев<sup>б</sup>, П. А. Стародубцев<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Дальневосточный федеральный университет

<sup>б</sup>Тихоокеанское высшее военно-морское училище им. С. О. Макарова  
Российская Федерация, Владивосток

**Аннотация.** В данной статье описывается актуальность цифровых систем связи и роль манипуляций сигналов в данных системах. Отмечается, что задача определения принятого сигнала в таких системах рассматривается как задача определения оценок параметров модулированного сигнала. Обсуждается решение такой задачи на основе сигнала с квадратурной манипуляцией. С помощью теоремы Рао-Крамера выведен расчет оценок параметров принятого сигнала. Также объяснена обработка такого сигнала в реальных условиях, при ситуациях, когда шум окрашенный.

**Ключевые слова:** цифровые системы связи, манипуляция, оценка параметров сигнала, теорема Рао-Крамера, метод максимального правдоподобия.

**Благодарности.** Данная работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности по проекту № FZNS-2023–0008.

Цитирование: Шостак С. В. Применение метода максимального правдоподобия для обработки сигналов в цифровых системах обмена информацией / С. В. Шостак, А. В. Бенгард, Е. А. Свердлов, Г. В. Дорофеев, П. А. Стародубцев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(3). С. 428–434. EDN: YMTKME

В современных системах обмена информацией основная ее часть передается в цифровом виде. Причём передается не аналоговый модулированный сигнал, а набор целых чисел, которые принимают значение из некоторого фиксированного конечного множества [1–3]. Эти числа, называемые символами, поступают от источника информации с определенной символьной скоростью. При этом выполняется основной принцип передачи дискретной последовательности символов – каждому из возможных значений символа сопоставляется некоторый набор параметров несущего колебания, т.е. проводится модуляция несущего колебания [1, 2]. Способ модуляции, когда параметры несущего колебания меняются скачкообразно, определяется как манипуляция. Эти параметры поддерживаются постоянными в течение определенного интервала до прихода следующего символа. В зависимости от того, какие параметры изменяются, различают амплитудную (АМн), фазовую (ФМн), частотную (ЧМн) и квадратурную (КАМ) манипуляции [1–3].

Особенность цифровых систем связи состоит в том, что задачей приемника является не точное воспроизведения сигнала, а определение на основе принятого искаженного шумами и помехами сигнала, какой из конечного набора был излучен передатчиком [1–3]. При распространении информационного сигнала в канале передачи его форма может исказиться за счет собственных помех канала и, возможно, преднамеренных помех. Это приводит к ошибкам в детектировании символов. Поэтому задачу определения принятого символа следует рассматривать как задачу оценки параметров модулированного сигнала.

Рассмотрим на примере сигналов с квадратурной манипуляцией (КАМ, или QASK) решение такой задачи на основе известной теоремы.

Как известно, в случае квадратурной манипуляции каждому из возможных значений дискретного символа ставится в соответствие пара величин – амплитуда  $A_m$  и начальная фаза  $\varphi_m$  несущего колебания [1–3]. Такой сигнал в дискретном виде имеет вид [1–3]

$$s_m(n) = A_m \cos(2\pi f_0 n + \varphi_m) = A_m \cos\left(2\pi f_0 n + \frac{2\pi}{M}(m-1)\right), \quad (1)$$

где  $A_m$  – амплитуда  $m$ -го символа;  $f_0 = \frac{f'_0}{f_s}$  – нормализованная несущая частота;  $f_s$  – частота дискретизации;  $f'_0$  – несущая частота;  $n$  – номер отсчета в области времени,  $n = 0 \div N-1$ ;  $N$  –

число отсчетов;  $\varphi_m = \frac{2\pi}{M}(m-1)$  – начальная фаза для  $m$ -го символа;  $m = 0 \div M$  – номер символа;

$M$  – число символов.

В реальной обстановке при воздействии аддитивного шума, под которым будем понимать шум канала + помехи

$$x_m(n) = A_m \cos(2\pi f_0 n + \varphi_m) + \omega_m(n), \quad (2)$$

где  $\omega(n)$  – искажающее воздействие (шум канала + помеха).

Для таких условий надо понимать не измерение параметров, а их оценки. Поэтому найдем оценки потенциальной точности параметров гармонического сигнала в (2) на основе теоремы Рао-Крамера, которая устанавливает нижнюю границу для дисперсии ошибки оценки параметров без относительно используемого метода оценки, считая, что  $\omega(n)$  – белый гауссов шум [4–6].

Для упрощения рассуждений перепишем (2) в следующем виде:

$$x(n) = A \cos(2\pi f_0 n + \varphi) + \omega(n), \quad (3)$$

Требуется оценить  $A, f_0, \varphi$ . Для этого сформируем информационную матрицу Фишера [4, 5]

$$[\mathbf{I}(\boldsymbol{\theta}_{\text{II}})] = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{\partial s[n, \boldsymbol{\theta}]}{\partial \theta_i} \cdot \frac{\partial s[n, \boldsymbol{\theta}]}{\partial \theta_j}, \quad (4)$$

где  $\sigma^2$  – дисперсия шума;  $i, j = 1, 2, 3$ ;  $\boldsymbol{\theta} = [A, f_0, \varphi]^T$  – вектор параметров.

Предположение, что  $f_0$  достаточно удалено от 0 и  $1/2$ , позволяет сделать определенные упрощения, основанные на аппроксимации [4]

$$\frac{1}{N^{i+1}} = \sum_{n=0}^{N-1} n^i \sin(4\pi f_0 n + 2\varphi) \approx 0, \quad (5)$$

$$\frac{1}{N^{i+1}} = \sum_{n=0}^{N-1} n^i \cos(4\pi f_0 n + 2\varphi) \approx 0 \quad (6)$$

для  $i = 0, 1, 2$ . Используя эту аппроксимацию и подставляя  $a = 2\pi f_0 n + \varphi$ , имеем

$$[\mathbf{I}(\boldsymbol{\theta}_{\text{II}})] = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{n=0}^{N-1} \cos^2 a = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{n=0}^{N-1} \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2a) \right] \approx \frac{N}{2\sigma^2}; \quad (7)$$

$$[\mathbf{I}(\boldsymbol{\theta}_{12})] = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{n=0}^{N-1} A \cdot 2\pi n \cos(a) \sin(a) = \frac{\pi A}{\sigma^2} \sum_{n=0}^{N-1} n \sin(2a) \approx 0; \quad (8)$$

$$[\mathbf{I}(\boldsymbol{\theta}_{13})] = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{n=0}^{N-1} A \cos(a) \sin(a) = -\frac{A}{2\sigma^2} \sum_{n=0}^{N-1} \sin(2a) \approx 0; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} [\mathbf{I}(\boldsymbol{\theta}_{22})] &= \frac{1}{\sigma^2} \sum_{n=0}^{N-1} A^2 (2\pi n)^2 \sin^2(a) = \\ &= \frac{(2\pi A)^2}{\sigma^2} \sum_{n=0}^{N-1} n^2 \left[ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(2a) \right] \approx \frac{(2\pi A)^2}{\sigma^2} \sum_{n=0}^{N-1} n^2; \end{aligned} \quad (10)$$

$$[\mathbf{I}(\boldsymbol{\theta}_{33})] = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{n=0}^{N-1} A^2 \sin^2 a \approx \frac{NA^2}{2\sigma^2}. \quad (11)$$

В результате информационная матрица Фишера становится

$$\mathbf{I}(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{\sigma^2} \begin{pmatrix} \frac{N}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 2A^2\pi^2 \sum_{n=0}^{N-1} n^2 & \pi A^2 \sum_{n=0}^{N-1} n \\ 0 & \pi A^2 \sum_{n=0}^{N-1} n & \frac{NA^2}{2} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

После инверсии  $\mathbf{I}(\boldsymbol{\theta})$  с использованием равенств

$$\sum_{n=0}^{N-1} n = \frac{N(N-1)}{2}, \quad (13)$$

$$\sum_{n=0}^{N-1} n^2 = \frac{N(N-1)(2N-1)}{6} \quad (14)$$

получим

$$\text{var}(\hat{A}) \geq \frac{2\sigma^2}{N}, \quad (15)$$

$$\text{var}(\hat{f}_0) \geq \frac{12}{(2\pi)^2 q^2 N(N-1)}, \quad (16)$$

$$\text{var}(\hat{\phi}) \geq \frac{2N(2N-1)}{q^2 N(N-1)}, \quad (17)$$

где  $q^2 = \frac{A^2}{2\sigma^2}$  – отношение сигнал/шум.

Необходимо заметить, что граница неравенства Рао-Крамера для частоты  $f_0$  уменьшается

с увеличением отношения сигнал/шум и уменьшается пропорционально  $\frac{1}{N^3}$ , делая ее чувствительной к длине сигнала.

Получение оценок рассмотрим на основе следующей теоремы.

**Теорема 2** [4–6]. Если данные наблюдения  $\mathbf{X}$  описываются общей линейной моделью вида

$$\mathbf{X} = \mathbf{H}\theta + \mathbf{W}, \quad (18)$$

где  $\mathbf{H}$  – известная  $N \times p$  матрица с  $N > p$  и ранга  $p$ ,  $\theta$  есть  $p \times 1$  вектор оцениваемых параметров,  $\mathbf{W}$  есть  $N \times 1$  вектор шума с плотностью функции распределения  $\mathbb{N}(\mathbf{O}, \mathbf{C})$ , тогда оценка  $\hat{\theta}$  по методу максимального правдоподобия есть

$$\hat{\theta} = (\mathbf{H}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{X}, \quad (19)$$

где  $\mathbf{C}$  – ковариационная  $N \times N$  матрица шума;  $()^{-1}$  – оператор обращения.

При этом полученная оценка  $\hat{\theta}$  эффективна, достигает границ неравенства Рао-Крамера и является несмещенной оценкой с минимальной дисперсией. Плотность функции распределения оценки  $\hat{\theta}$  имеет вид

$$\hat{\theta} \sim \mathbb{N}\left(\theta, (\mathbf{H}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{H})^{-1}\right). \quad (20)$$

Для приложения результатов теоремы 2 проведём некоторые преобразования сигнала  $x_m(n)$ , для чего представим выражение (2) следующим образом:

$$\begin{aligned} x_m(n) &= A_m \cos\left(\frac{2\pi}{M}(m-1)\right) \cos(2\pi f_0 n) - \\ &- A_m \sin\left(\frac{2\pi}{M}(m-1)\right) \sin(2\pi f_0 n) + \omega(n) = \\ &= a_m \cos(2\pi f_0 n) + b_m \sin(2\pi f_0 n) + \omega(n), \end{aligned} \quad (21)$$

где

$$a_m = A_m \cos\left(\frac{2\pi}{M}(m-1)\right); \quad (22)$$

$$b_m = -A_m \sin\left(\frac{2\pi}{M}(m-1)\right). \quad (23)$$

Из выражения (21) следует, что для определения символа на плоскости, т.е. «в созвездии», необходимо получить оценки  $a_m$  и  $b_m$ , которые удобно представлять в виде комплексного числа

в алгебраической  $(a_m + jb_m)$  или комплексной форме  $s_m = A_m \exp\left(-j \frac{2\pi}{M}(m-1)\right)$ , где  $j$  – мнимая

единица.

В нашем случае представим выражение (21) в векторно-матричном виде

$$\underbrace{\begin{bmatrix} x_m(0) \\ \vdots \\ x_m(N-1) \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}(n)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \cos\left(\frac{2\pi}{N} k_0 (N-1)\right) & -\sin\left(\frac{2\pi}{N} k_0 (N-1)\right) \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} a_m \\ b_m \end{bmatrix}}_{\theta_m} + \underbrace{\begin{bmatrix} \omega(0) \\ \vdots \\ \omega(N-1) \end{bmatrix}}_{\mathbf{w}_m}. \quad (24)$$

Далее выразим (24) в более компактном виде

$$\mathbf{X} = \mathbf{H}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{W}, \quad (25)$$

где  $\mathbf{X} - N \times 1$  вектор принятого сигнала;  $\mathbf{H} = [\mathbf{e}_1(\mathbf{n}) \ \mathbf{e}_2(\mathbf{n})] - N \times 2$  известная матрица;  $\boldsymbol{\theta} = [a_m \ b_m]^T - 2 \times 1$  вектор параметров;  $[\ ]^T$  – оператор транспонирования;  $\mathbf{W} - N \times 1$  вектор аддитивного шума.

Выражение (25) представляет линейную модель формирования символа. В результате обработки принятого сигнала  $\mathbf{X}(\mathbf{n})$ , представленного выражением (25), требуется получить оценку вектора  $\boldsymbol{\theta}$ .

Из проведенных рассуждений следует, что оценку параметров  $a_m$  и  $b_m$  целесообразно проводить согласно выражению (19). После получения оценок  $\hat{a}_m$  и  $\hat{b}_m$  несложно найти оценки амплитуды  $\hat{A}_m$  и начальной фазы  $\hat{\varphi}_m$  соответственно

$$\hat{A}_m = \sqrt{\hat{a}_m^2 + \hat{b}_m^2}; \quad (26)$$

$$\hat{\varphi}_m = \tan^{-1} \left( \frac{\hat{a}_m}{\hat{b}_m} \right). \quad (27)$$

В частном случае, когда  $\omega(n)$  – белый шум, выражение (19) примет следующий вид:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{X}. \quad (28)$$

Соответственно, выражение для плотности функции распределения (28) становится

$$\mathbb{N} \left( \boldsymbol{\theta}, \frac{2\sigma^2}{N} \right), \quad (29)$$

где  $\sigma^2$  – дисперсия белого шума.

В реальных условиях на длительности сигнала шум, как правило, считается стационарным, хотя и не всегда белым. Свойство стационарности шума позволяет оценивать его первые два момента для получения ковариационной матрицы  $\mathbf{C}$ . Следует также отметить, что умножение входного сигнала  $\mathbf{X}$  на  $\mathbf{C}^{-1}$  в (19) приводит к отбеливанию искажающей составляющей  $\mathbf{W}$ .

Приложение метода максимального правдоподобия рассмотрено на примере обработки сигналов с квадратурной манипуляцией в условиях воздействия аддитивного шума. При этом предполагается, что шум может быть окрашенным. Для применения метода максимального правдоподобия модель формирования таких сигналов представлена в линейном векторно-матричном виде (25). Проведен анализ потенциальной точности оценки информационных параметров сигнала (3) на основе теоремы Рао-Крамера [3], для чего была определена информационная матрица Фишера. Затем после её обращения получены выражения для дисперсии параметров информационного сигнала. Представление сигнала в векторно-матричном виде позволяет для его обработки применять результаты теоремы 2 – выражение (19). Показано, что в частном случае, когда искажающее воздействие – белый шум, оценка параметров проводится согласно выражению (28). Изложенный способ оценки параметров может быть также распространён и на другие виды модуляции сигналов в цифровых системах передачи, для чего необходимо, естественно, формировать матрицу  $\mathbf{H}$  в выражении (25) соответствующего вида.

### Список литературы / References

- [1] Скляр Б. *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение*. Пер. с англ. М.: издательский дом «Вильямс», 2007, 1104 с. [Sklyar B. *Digital communications. Theoretical foundations and practical application*. Moscow: Williams Publishing House, 2007, 1104 p. (In Rus.)]
- [2] Прокис Дж. *Цифровая связь*. М.: Радио и связь, 2000, 800 с. [Prokis J. *Digital communications*. Moscow: Radio and Communications, 2000, 800 p. (In Rus.)]
- [3] Сергиенко А.В. *Цифровая обработка сигналов*. СПб.: Питер, 2011, 768 с. [Sergienko A. V. *Digital signal processing*. St. Petersburg: Piter, 2011, 768 p. (In Rus.)]
- [4] Kay М. Steven. *Fundamentals of Statistical Signal processing: Estimation Theory*. Prentice Hall PRT, 1993, 465 p.
- [5] Ggaybill F. A. *Theory and Application of Linear Model*, Duxbury press, North Seituante, Mass, 1976, 704 p.
- [6] Рао С.Р. *Линейные статистические методы и их применение*. Пер. с англ.; ред. Ю.В. Линник. М.: Наука, 1968, 546 с. [Rao С.Р. *Linear statistical methods and their application*; edited by Yu. V. Linnik Moscow: Nauka, 1968, 546 p. (In Rus.)]