

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

**Журнал Сибирского  
федерального университета  
Техника и технологии**

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

**2025 18 (8)**

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

2025 18(8)

# 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*

№ 8. 29.12.2025. 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 19.12.2025. Формат 60x90/8. Усл. печ. л. 11,7.  
Уч.-изд. л. 11,2. Бумага тип. Печать офсетная. Тираж 1000 экз. Заказ № 23373.

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

- Andrey N. Rogalev, Ilya I. Feoktistov,  
Pavel A. Bryzgunov, Andrey N. Vegera and Dmitry S. Pisarev**  
Numerical and Experimental Study of Flow Structure in a Furnace Model with a Fluidized Bed ..... 1002
- Kirill Yu. Litvintsev, Konstantin A. Finnikov and Tatiana V. Ponomareva**  
Analysis of Thermophysical Properties of Cryolithozone Soils Using Data  
of the Vertical Temperature Profile Monitoring..... 1013
- Marat M. Gafurov and Tatiana A. Kulagina**  
Application of a Thermal Insulation Cover Using the Rank-Hilsch Effect in Firefighting Practice ..... 1026
- Vasily I. Murko, Viktor I. Karpenok and Nikita A. Lisovskiy**  
Results of Aeromechanical Dewatering of Coal on a Bench-Stand Setup ..... 1036
- Stepan A. Klimov, Fedor M. Noskov,  
Aleksandr M. Tokmin and Oleg A. Masansky**  
Production of Laminated Composite Based on High-Speed Steel by Induction Surfacing ..... 1041
- Afanasiy A. Dyakonov, Andrey P. Vasilyev,  
Pavel V. Vinokurov, Aytalina A. Okhlopkova and Evgeniy G. Parenko**  
Influence of Carbon Black Content in Rubber Compound on the Properties of Nitrile Rubber ..... 1049
- Denis I. Popov and Erbol I. Minzhasov**  
Investigation of the Effectiveness of the Loss Reduction Method when Testing Induction Machines  
Using SimInTech Dynamic Modeling Environments ..... 1062
- Kirill A. Pavlov**  
Estimation of the Solar Energy Potential of Kamchatka on the Example of Petropavlovsk-Kamchatsky ..... 1072
- Sergey A. Gorbunov,  
Pavel N. Khatuntsev, Alexander A. Kuchin, I. Khasan,  
Vadim A. Nenashev, Kseniya V. Lagoshina and Igor V. Lyutikov**  
The Algorithm of Trajectory Control of an Unmanned Aerial Vehicle and Its Radar Antenna  
when Forming a Radar Image a Land-Based Facility ..... 1081
- ### Math Modeling. Numerical Experiment
- Gennadiy B. Masalsky and Ruslan T. Galemov**  
Model-Oriented Design of a Discrete One-Dimensional Extremal Control System..... 1100
- ### Information and Communication Technologies
- Muhanned AL-Rawi**  
Raman Optical Amplifier: US Patents..... 1124
- Marina A. Polyakova, Eduard M. Golubchik and Marina N. Samodurova**  
Application of System Engineering Approach as a Method to Assess the Process  
of Coatings Functional Properties Formation ..... 1131

## СОДЕРЖАНИЕ

### Исследования. Проектирование. Опыт эксплуатации

**А. Н. Рогалев, И. И. Феоктистов,**

**П. А. Брызгунов, А. Н. Вегера, Д. С. Писарев**

Численное и экспериментальное исследование структуры течения в модели топки с псевдооживленным слоем ..... 1002

**К. Ю. Литвинцев, К. А. Финников, Т. В. Пономарёва**

Анализ теплофизических свойств почв криолитозоны по данным мониторинга вертикального профиля температуры..... 1013

**М. М. Гафуров, Т. А. Кулагина**

Применение теплоизоляционного чехла с использованием эффекта Ранка-Хилша в практике тушения пожаров ..... 1026

**В. И. Мурко, В. И. Карпенко, Н. А. Лисовский**

Результаты аэромеханического обезвоживания угля на стендовой установке ..... 1036

**С. А. Климов, Ф. М. Носков, А. М. Токмин, О. А. Масанский**

Получение слоистого композита на основе быстрорежущей стали методом индукционной наплавки ..... 1041

**А. А. Дьяконов, А. П. Васильев,**

**П. В. Винокуров, А. А. Охлопкова, Е. Г. Паренко**

Влияние содержания технического углерода на свойства бутадиен-нитрильного эластомера ..... 1049

**Д. И. Попов, Е. И. Минжасов**

Исследование эффективности способа снижения потерь при испытаниях асинхронных машин с применением среды динамического моделирования SimInTech ..... 1062

**К. А. Павлов**

Оценка гелиоэнергетического потенциала Камчатского края на примере г. Петропавловска-Камчатского..... 1072

**С. А. Горбунов, П. Н. Хатунцев, А. А. Кучин,**

**И. Хасан, В. А. Ненашев, К. В. Лагошина, И. В. Лютиков**

Алгоритм траекторного управления беспилотным летательным аппаратом и антенной его радиолокационной станции при формировании радиолокационного изображения наземного объекта..... 1081

### Математическое моделирование. Численный эксперимент

**Г. Б. Масальский, Р. Т. Галемов**

Модельно-ориентированное проектирование дискретной одномерной системы экстремального управления ..... 1100

### Информационно-коммуникационные технологии

**Муханнед Аль-Раби**

Оптический усилитель Рамана: патенты США ..... 1124

**М. А. Полякова, Э. М. Голубчик, М. Н. Самодурова**

Использование системного инжиниринга как метода оценки процесса формирования функциональных свойств покрытий..... 1131

**Researching. Design.  
Operating Experience**

**Исследования.  
Проектирование.  
Опыт эксплуатации**



Theoretical and Applied Heat Engineering  
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: KHZQWV

УДК 621.18

**Numerical and Experimental Study of Flow Structure  
in a Furnace Model with a Fluidized Bed**

**Andrey N. Rogaley,  
Ilya I. Feoktistov\*, Pavel A. Bryzgunov,  
Andrey N. Vegera and Dmitry S. Pisarev**  
*National Research University  
“Moscow Power Engineering Institute”  
Moscow, Russian Federation*

Received 30.06.2025, received in revised form 25.10.2025, accepted 29.10.2025

**Abstract.** The article is devoted to numerical and experimental studies of the flow structure in fluidized bed furnace models. The main methods and approaches to numerical modeling of the fluidized bed flow structure are analyzed. Two characteristic geometries of the working chambers of fluidized bed and circulating fluidized bed units were considered as objects. As a result of the experiments, the distributions of the concentration of layer particles in the inner volume of the working chambers were determined. It was found that in the model chamber of the circulating fluidized bed at a speed of 1.5 m/s, the particle flow in height is divided into zones with the maximum concentration of particles in the lower part and the dilute phase in the central part of the chamber, and at a speed of 6 m/s, the dilute phase occupied the entire volume of the chamber. No flow separation was detected in the fluidized bed chamber under similar conditions. Based on the data obtained as a result of the experiment, a numerical simulation of the fluidization process in the chamber of the unit with a circulating fluidized bed was carried out. A comparison of the numerical simulation results with the experimental data for the modes at air supply speeds of 4, 5 and 6 m/s showed that the average deviation of the pressure drop in the furnace is more than 5%. It is established that numerical simulation of the process reproduces the structure of the flow accurately enough for qualitative assessments of the effectiveness of engineering and design solutions.

**Keywords:** fluidization, fluidized bed, circulating fluidized bed, numerical simulation, Euler-Euler method.

**Acknowledgements.** The study was conducted at the National Research University “MPEI” with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (state assignment No. FSWF-2023–0014, agreement No. 075–03–2023–383 dated January 18, 2023).

---

© 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: ifeoktistov01@gmail.com

Citation: Rogalev A. N., Feoktistov I. I., Bryzgunov P. A., Vegera A. N., Pisarev D. S. Numerical and Experimental Study of Flow Structure in a Furnace Model with a Fluidized Bed. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(8), 1002–1012. EDN: KHZQWV



## Численное и экспериментальное исследование структуры течения в модели топки с псевдоожиженным слоем

А. Н. Рогалев, И. И. Феоктистов,  
П. А. Брызгунов, А. Н. Вегера, Д. С. Писарев  
*Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
Российская Федерация, Москва*

**Аннотация.** Статья посвящена численным и экспериментальным исследованиям структуры течения в моделях топок с псевдоожиженным слоем. Проанализированы основные методы и подходы к численному моделированию структуры течения псевдоожиженного слоя. В качестве объектов рассматривались две характерные геометрии рабочих камер агрегатов с кипящим слоем и циркулирующим кипящим слоем. В результате проведенных экспериментов были определены распределения концентрации частиц слоя во внутреннем объеме рабочих камер. Установлено, что в модельной камере циркулирующего кипящего слоя при скорости 1,5 м/с поток частиц по высоте разделяется на зоны с максимальной концентрацией частиц в нижней части и разбавленной фазы в центральной части камеры, а при скорости 6 м/с разбавленная фаза занимала целиком весь объем камеры. В камере кипящего слоя при аналогичных условиях разделения потока не было зафиксировано. Основываясь на данных, полученных в результате эксперимента, было проведено численное моделирование процесса псевдоожижения в камере агрегата с циркулирующим кипящим слоем. Сравнение результатов численного моделирования с данным, полученным в результате эксперимента, для режимов при скоростях подачи воздуха 4, 5 и 6 м/с показало, что среднее значение отклонения перепада давления в топке составляет на более 5 %. Установлено, что численное моделирование процесса воспроизводит структуру течения потока достаточно точно для качественных оценок эффективности инженерных и конструкторских решений.

**Ключевые слова:** псевдоожижение, кипящий слой, циркулирующий кипящий слой, численное моделирование, метод Эйлера-Эйлера.

**Благодарности.** Исследование проведено в НИУ «МЭИ» при финансовой поддержке Минобрнауки России (государственное задание № FSWF-2023–0014, соглашение № 075–03–2023–383 от 18 января 2023 г.).

Цитирование: Рогалев А. Н. Численное и экспериментальное исследование структуры течения в модели топки с псевдоожиженным слоем / А. Н. Рогалев, И. И. Феоктистов, П. А. Брызгунов, А. Н. Вегера, Писарев Д. С. // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(8). С. 1002–1012. EDN: KHZQWV

### Введение

Основным источником антропогенного загрязнения атмосферы остаются углеродные выбросы, генерируемые энергетическими и промышленными предприятиями при использовании различных видов топлива. Применение современных технологий улавливания и захоронения углекислого газа (CCS) позволяет снизить объем вредных выбросов, однако сопровождается ростом себестоимости производимой продукции [1].

Одним из перспективных подходов к решению задачи снижения объема выбросов является внедрение высокоэффективных и экологичных технологий газификации и сжигания, таких как использование установок с псевдооживленным слоем. Газификация и сжигание топлива в псевдооживленном слое обеспечивает интенсивный массо- и теплообмен между частицами топлива и окислителем, что практически исключает механический и химический недожог. Это делает целесообразным применение таких установок для применения низкорекреационных видов топлива.

Несмотря на потенциал широкого применения технологий газификации и сжигания в псевдооживленном слое и их значимость для развития энергетики, в отечественной промышленности они пока не получили массового распространения. Одной из причин этого является сложность проектирования установок псевдооживленного слоя, связанная с необходимостью учета динамики движения частиц в слое, включая процессы их уноса, сепарации и рециркуляции в топку.

Для инженерных расчетов установок с псевдооживленным слоем рационально применение численного моделирования с целью предварительной оценки работоспособности разработанной конструкции топки. Однако ввиду сложности математических моделей описания движения частиц слоя необходима валидация результатов моделирования посредством сопоставления с экспериментальными данными с целью определения применимости выбранных моделей и методов.

Для моделирования запыленных потоков применяются два подхода [2, 3] к численному моделированию многофазного потока: метод Эйлера-Лагранжа [4, 5] и метод Эйлера-Эйлера [6, 7]. Эти модели отличаются друг от друга методом описания рабочих сред и их взаимодействия друг с другом, что оказывает существенное влияние на точность результатов моделирования и скорость проведения расчета.

В модели Эйлера-Лагранжа первичная фаза рассматривается как континуум путем решения усредненных по времени уравнений Навье-Стокса [8, 9]. Поведение дисперсных фаз определяется путем отслеживания большого количества частиц с помощью рассчитанного поля потока первичной фазы. В ходе расчетов течения первичной фазы рассчитываются траектории частиц в заданных интервалах, при этом дисперсные и первичные фазы могут обмениваться массой, импульсом и энергией. Основное предположение в этой модели состоит в том, что объемная доля дисперсной вторичной фазы составляет менее 10–12 %, хотя ее масса может быть больше массы первичной фазы [10].

Различные фазы в подходе Эйлера-Эйлера рассматриваются как взаимопроникающие континуумы, представляя таким образом фазовые объемные доли как непрерывные функции времени и пространства [11]. Сумма всех объемных долей фаз в каждой расчетной ячейке равна единице. К каждой фазе применяются законы сохранения, чтобы получить систему уравнений, аналогичную для всех фаз. Поскольку в этой модели дополнительные уравнения сохранения массы и импульса решаются для каждой фазы отдельно, существует возможность смоделировать любую комбинацию жидкой, газовой и твердой фаз [12, 13].

В табл. 1 представлено обобщенное описание моделей, используемых для моделирования течения плотного газа и твердого тела в контексте псевдооживления газа.

Метод Эйлера-Лагранжа является более точным, так как просчитывает движение частиц и может учитывать их взаимодействие друг с другом и поверхностью стенок камеры, но такой расчет требует привлечения существенных вычислительных мощностей и занимает продолжительное время, при этом решаться такая задача может только в потоке.

Таблица 1. Классификация различных моделей псевдооживления [14, 15]

Table 1. Classification of different fluidization models [14, 15]

Модель	Уравнение твердой фазы	Уравнение жидкой фазы	Область применения
Дискретная пузырьковая модель	Лагранж	Эйлер	Промышленные установки (<10 м)
Двухжидкостная модель	Эйлер	Эйлер	Инженерные расчеты (1м)
Неразрешенное уравнение дискретных частиц	Эйлер	Лагранж	Лабораторные исследования (0,1 м)
Разрешенное уравнение дискретных частиц	Эйлер	Лагранж	Лабораторные исследования (0,01 м)
Молекулярная динамика	Лагранж	Лагранж	Лабораторные исследования (<0,001 м)

При этом метод Эйлера-Эйлера менее точный, так как не рассматривает каждую отдельную частицу, но позволяет относительно быстро оценить влияние отдельных геометрических параметров геометрии камер и гидродинамических характеристик потока на процесс псевдооживления слоя. Однако по причине низкой точности метода результаты моделирования должны быть валидированы путем постановки эксперимента.

Данная работа посвящена численному и экспериментальному исследованию структуры течения в псевдооживленном слое в модельных камерах с кипящим и циркулирующим кипящим слоем с целью определения применимости упрощенного эйлеровского подхода к моделированию задач такого класса.

### Объект и методы исследования

Явление псевдооживления наблюдается при подаче через слой частиц оживающего агента со скоростью, достаточной для начала движения частиц, также называемой критической скоростью. При этом скорости потока недостаточно для витания частиц, из-за чего вынесенные из слоя частицы падают обратно в слой. По этой причине для агрегатов с кипящим слоем (КС) характеризующей является критическая скорость, поскольку необходимо добиться явления псевдооживления и минимизировать унос частиц из слоя. В то же время для агрегатов с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС) за счет организации возврата унесенных и уловленных частиц обратно в топочное пространство характеризующей является скорость витания.

Из-за разных характеризующих скоростей для КС и ЦКС были разработаны две различные камеры. Целью экспериментального исследования является изучение распределения концентраций частиц во внутреннем пространстве камер с различной геометрией в зависимости от скорости оживающего воздуха. Скорость оживающего воздуха определялась при помощи дифманометра на входе в установку. В табл. 2 приведены параметры, при которых проводилось экспериментальное исследование.

На рис. 1а и б представлена трехмерная модель КС и ЦКС. Особенностью данного стенда является сменяемый прозрачный короб, который позволяет визуально фиксировать потоки движущихся частиц под воздействием потока воздуха.

Таблица 2. Условия проведения эксперимента

Table 2. Experimental conditions

Величина	Значение
Атмосферное давление, мм рт. ст.	$P_{\text{возд}} = 762$
Температура, °C	$T_{\text{возд}} = 27$
Молярная масса, кг/моль	$M = 0,029$
Универсальная газовая постоянная, Дж/моль К	$R = 8,34417$

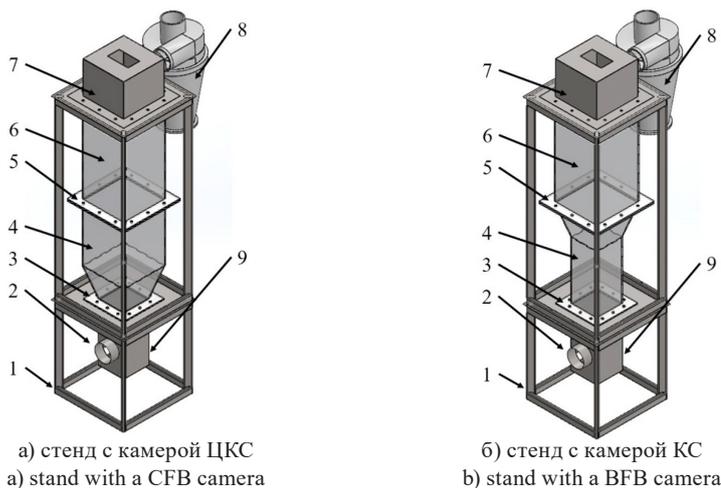


Рис. 1. Лабораторный стенд для исследования гидродинамики псевдооживленного слоя: 1 – каркас; 2 – воздухораспределительная камера; 3 – малый фланец; 4 – сменная камера; 5 – большой фланец; 6 – основная камера; 7 – крышка; 8 – циклонный сепаратор; 9 – место подключения дифманометра

Fig. 1. Laboratory bench for studying the hydrodynamics of a fluidized bed: 1 – frame; 2 – air distribution chamber; 3 – small flange; 4 – replaceable chamber; 5 – large flange; 6 – main chamber; 7 – cover; 8 – cyclone separator; 9 – connection point of the diffmanometer

Рабочий материал с размером частиц не менее диаметра ячейки воздухораспределительной решетки равной 1 мм загружается через верхнее отверстие в крышке 7. Воздух поступает через трубопровод диаметром 102 мм в воздухораспределительную камеру 2 и проходит через решетку квадратного сечения 150 x 150 мм. Далее запыленный поток воздуха попадает в циклонный сепаратор 8 в котором происходит улавливание унесенных частиц слоя, а очищенный воздух уходит обратно в атмосферу.

Чтобы стенд не получил повреждений, поток воздуха изначально запускается в трубопровод, подключенный параллельно. Далее при помощи задвижки поток воздуха перенаправляют в соединительную трубу, подключенную к стенду. Одновременно с этим производились замеры избыточного давления воздуха при помощи дифманометра Trotec TA400 с трубкой Пито-Прандтля.

Перед проведением эксперимента был проведен предварительный расчет по определению скоростей псевдооживления для гречневой крупы, используемой в качестве модельного мате-

риала. В табл. 3 приведены результаты этого расчета, которые впоследствии использовались для задания граничных условий при численном моделировании, а на рис. 2 показаны геометрические размеры модели и соответствующая сетка для камеры ЦКС.

Таблица 3. Исходные данные для численного моделирования

Table 3. Initial data for numerical modeling

Величина	Значение
Эквивалентный диаметр частиц, мм	$d_{\text{ч}} = 3,2$
Истинная плотность частиц, кг/м <sup>3</sup>	$\rho_{\text{ч}} = 1060$
Плотность воздуха, кг/м <sup>3</sup>	$\rho_{\text{в}} = 1,205$
Кинематическая вязкость воздуха, м <sup>2</sup> /с	$\vartheta_{\text{в}} = 15,11 \cdot 10^{-5}$
Скорость начала ожигения, м/с	$W_{\text{кр}} = 0,302$
Скорость витания, м/с	$W_{\text{внт}} = 6,917$

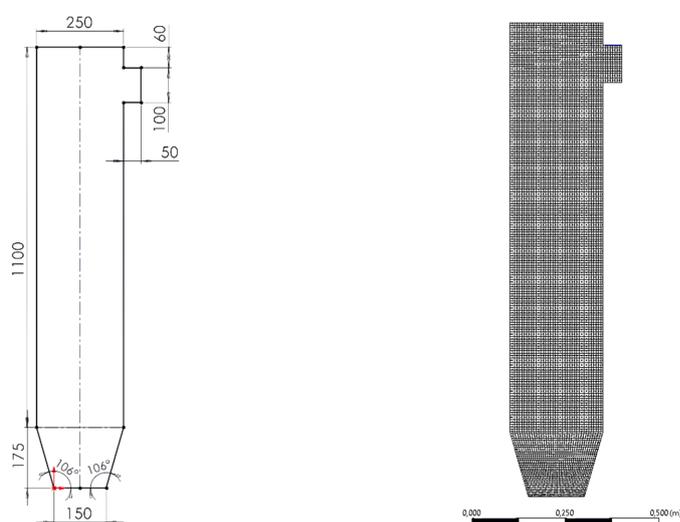


Рис. 2. Геометрические размеры и расчетная сетка для моделирования камеры ЦКС

Fig. 2. Geometric dimensions and computational grid for modeling the CFB chamber

Расчет проводился для режимов псевдоожигения со скоростями подачи воздуха 1,5; 4; 5 и 6 м/с. Расчет пристеночной функции осуществлялся методом *Scalable Wall Function* модели турбулентности *k-ε*. Выбор этой функции был обусловлен обеспечением стабильности расчета при моделировании псевдоожигенного слоя в нестационарной постановке в течение относительно длительных промежутков времени (25 с). Размер ячейки расчетной сетки был принят равным двум диаметрам частицы (6,4 мм).

В псевдоожигенном слое от распределения потока частиц зависят скорости реакций и поведение теплопередачи. Поэтому необходимо оценить этот поток частиц, чтобы лучше понять распределение частиц и массовую нагрузку в топке. Поток частиц состоит из двух

компонентов: восходящего потока и нисходящего потока. Восходящий поток располагается в центре поперечного сечения топки из-за высокого сопротивления движению газа материалом, при этом нисходящий поток частиц возникает в пристеночном пространстве. Движение этих потоков характеризуется высоким содержанием частиц слоя, что позволяет их визуально наблюдать.

В качестве модельного материала использовалась крупа гречневая. Движение частиц материала и распределение их концентраций исследовались посредством видеофиксации.

### Результаты исследования

Данные, полученные в результате проведения опытов, занесены в табл. 4 и 5.

На рис. 3 и 4 представлены распределения концентраций внутри рабочих камер для ЦКС и КС при различных скоростях подачи оживающего агента соответственно. Как видно, частицы преимущественно витают в центральной части потока, а в пристеночном пространстве камеры падают обратно в слой.

Таблица 4. Результаты испытаний камеры ЦКС

Table 4. Results of the CFB chamber tests

Номер испытания	Измеренное давление $P_{изб}$ , Па	Скорость воздуха в сечении трубопровода $V_{возд.труб}$ , м/с	Действительный расход воздуха $G_{возд}$ , кг/с	Скорость воздуха в сечении воздухораспределительной решетки $V_{возд.реш}$ , м/с
1	74	11,07	0,106	4,023
2	110	14,00	0,134	5,084
3	168	16,77	0,161	6,090

Таблица 5. Результаты испытаний камеры КС

Table 5. Results of the BFB chamber tests

Номер испытания	Измеренное давление $P_{изб}$ , Па	Скорость воздуха в сечении трубопровода $V_{возд.труб}$ , м/с	Действительный расход воздуха $G_{возд}$ , кг/с	Скорость воздуха в сечении воздухораспределительной решетки $V_{возд.реш}$ , м/с
1	70	11,53	0,111	4,187
2	115	13,63	0,131	4,950
3	165	17,71	0,170	6,431

В камере ЦКС при низких скоростях наблюдалось явное разделение концентраций частиц на зоны с максимальной концентрацией частиц, разбавленной фазы и уровня максимального подъема частиц по высоте камеры, причем при скорости 6 м/с разбавленная фаза занимала целиком весь объем камеры. В камере КС при аналогичных условиях такого явления не наблюдается, поскольку из-за специальной геометрии в слое создается большой перепад давления и частицы, выброшенные из верхней части, быстрее возвращаются обратно (рис. 4).

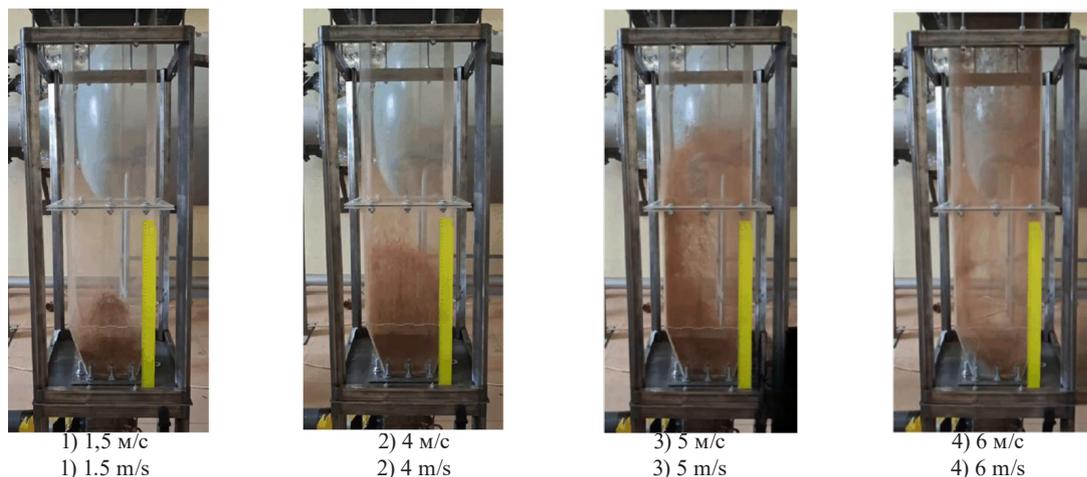


Рис. 3. Распределение частиц в камере ЦКС при различных режимах

Fig. 3. Particle distribution in the CFB chamber under various modes

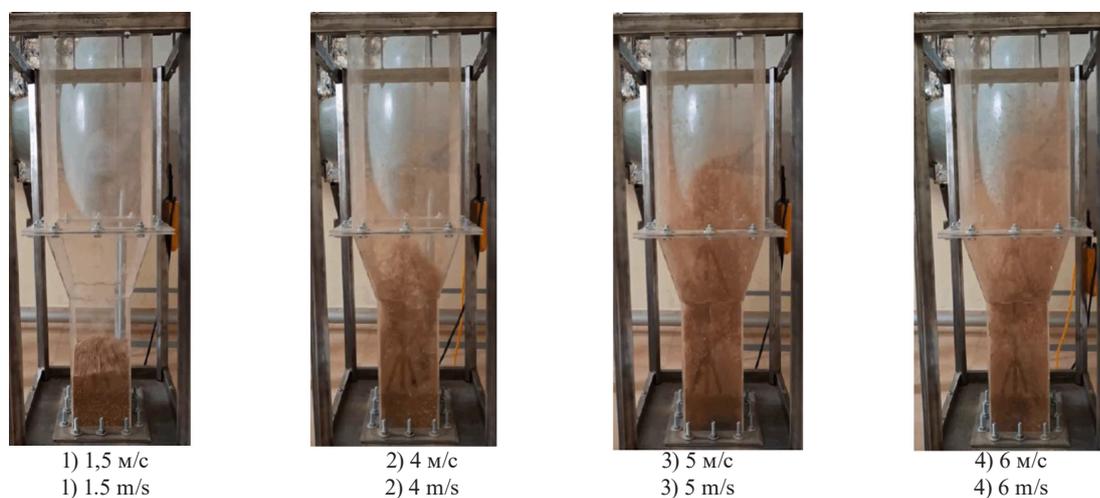


Рис. 4. Распределение частиц в камере КС при различных режимах

Fig. 4. Particle distribution in the BFB chamber under various modes

В результате численного моделирования псевдоожижения слоя по рассмотренной ранее методике были получены эпюры распределения концентраций частиц во внутреннем объеме топочной камеры, представленные на рис. 5.

На основании полученных данных экспериментального исследования была проведена оценка погрешности результатов численного моделирования для камер КС и ЦКС при скорости подачи воздуха 4, 5 и 6 м/с (рис. 6). Установлено, что отклонение измеренных величин не превышает 5 %, что позволяет сделать вывод о том, что результаты численного моделирования качественно соотносятся с данными эксперимента.

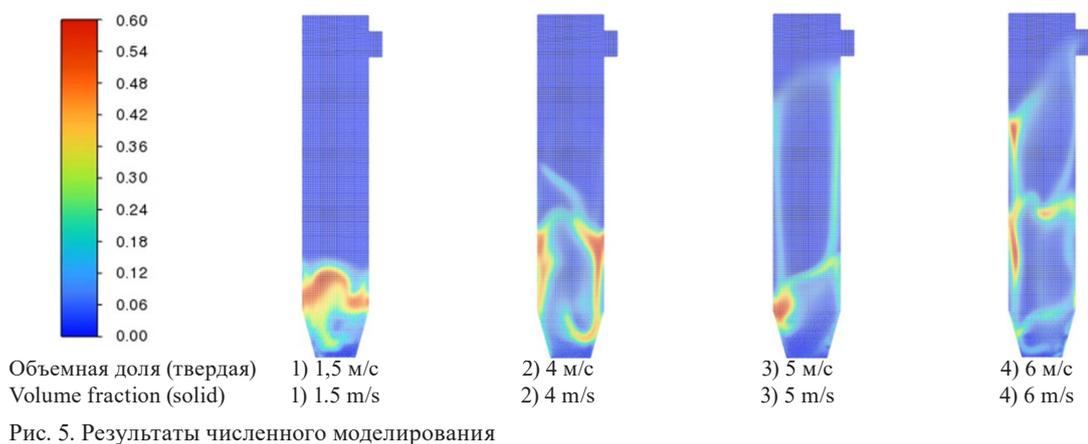


Рис. 5. Результаты численного моделирования

Fig. 5. Numerical simulation results

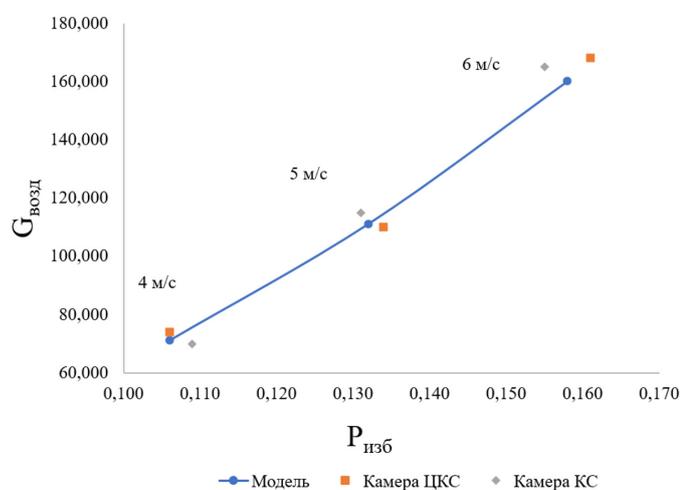


Рис. 6. Зависимость давления от расхода воздуха

Fig. 6. Dependence of the pressure on the air flow

### Заключение

1. Разработан экспериментальный стенд для исследования структуры течения в топках с псевдооживленным слоем. Его особенность заключается в возможности визуального наблюдения потоков через прозрачные стенки, а также возможность моделирования течений в камерах КС и ЦКС.

2. Основываясь на полученных данных, можно сделать вывод, что моделирование псевдооживленного слоя в постановке модели Эйлера-Эйлера не требует построения особенно мелких и точных расчетных сеток, поскольку сама по себе постановка задачи численного моделирования режима псевдооживления слоя частиц накладывает ряд ограничений и допущений. При этом гораздо более важную роль играет возможность проведения численного моделирования в нестационарном режиме достаточно длительного временного отрезка при сравнительно низких требованиях к вычислительным мощностям. Такой подход обеспечит решение различ-

ных инженерных и конструкторских задач, которые лежат в основе разработки и совершенствования рабочих камер агрегатов КС и ЦКС.

3. По результатам экспериментальных исследований определены концентрации распределения частиц слоя по внутреннему объему в двух характерных рабочих камерах для агрегатов КС и ЦКС. Установлено, что в камере ЦКС при скорости 1,5 м/с происходит разделение потока частиц на зоны с максимальной концентрацией частиц в нижней части камеры, разбавленной фазы в центральной части и уровня максимального подъема частиц по высоте камеры, в то же время при скорости 6 м/с разбавленная фаза занимала целиком весь объем камеры. В камере КС при аналогичных условиях разделения потока не было зафиксировано, поскольку из-за сужения в нижней части камеры в слое создается большой перепад давления и частицы, выброшенные из верхней части, быстрее возвращаются обратно.

4. Было проведено численное моделирование процесса псевдооживления с использованием континуальной модели Эйлера-Эйлера. Было установлено, что расхождение результатов моделирования с данными экспериментального исследования по перепаду давления в слое частиц составляет не более 5 %.

5. На основании результатов проведенного численного и экспериментального исследования установлено, что численное моделирование процесса псевдооживления воспроизводит структуру течения потока в топках с КС и ЦКС достаточно точно для качественных оценок эффективности инженерных и конструкторских решений, направленных на разработку и внедрение технологии газификации и сжигания в псевдооживленном слое в отечественной энергетике.

#### Список литературы / References

[1] Yadav S., Mondal S. S. A review on the progress and prospects of oxy-fuel carbon capture and sequestration (CCS) technology, *Fuel*, 2022, 308, 122057.

[2] Шестаков Е. А., Загидуллин С. Х., Тонков М. В. Обоснование выбора математической модели для описания гидродинамики аппаратов с взвешенным транспортируемым слоем средствами вычислительной гидродинамики, *Вестник ПНИПУ*, 2017, 4, 138–151. [Shestakov E. A., Zagidullin S. H., Tonkov M. V. Justification of the choice of a mathematical model for describing the hydrodynamics of devices with a suspended transported layer by means of computational hydrodynamics, *Vestnik of PNIPU*, 2017, 4, 138–151 (in Russian)]

[3] Гиль А. В., Заворин А. С., Кокшарев О. М. Подходы к численному моделированию топочных камер с циркулирующим кипящим слоем, *Известия Томского политехнического университета*, 2020, 331(7), 71–86. [Gil A. V., Zavorin A. S., Koksharev O. M. Approaches to numerical modeling of combustion chambers with a circulating fluidized bed, *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta*, 2020, 331(7), 71–86 (in Russian)]

[4] Fan F. et al. Numerical study of fluid dynamics and heat transfer property of dual fluidized bed gasifier, *Energy*, 2021, 234, 121246.

[5] Wang L. et al. Numerical study on characteristics of biomass oxygen enriched gasification in the new gasifier on an experimental basis, *Renewable Energy*, 2021, 179, 815–827.

[6] Xing X. et al. Numerical study of the effect of the inlet gas distributor on the bubble distribution in a bubbling fluidized bed, *Chemical Engineering Research and Design*, 2022, 177, 70–82.

- [7] Banik R. K., Das H. J., Kalita P. Numerical investigation of bed hydrodynamics for biomass-coal blending in a dual fluidized bed system, *Powder Technology*, 2025, 456, 120807.
- [8] Xia H. et al. Modeling and numerical study of particle-bubble-liquid flows using a front-tracking and discrete-element method, *Applied Mathematical Modelling*, 2023, 114, 525–543.
- [9] Sun H. et al. Numerical investigation on the influence of immersed tube bundles on biomass gasification in industrial-scale dual fluidized bed gasifier, *Fuel*, 2024, 357, 129742.
- [10] Очков А. А., Годорожа С. В., Хамади М. И. Исследование процесса пневмотранспорта гранул полиэтилена в поворотных коленах трубопровода, *Известия высших учебных заведений*, 2024, 11(776), 79–88. [Ochkov A. A., Godorozh S. V., Khamadi M. I. Study of the process of pneumatic transport of polyethylene granules in pipeline elbows, *Izvestiya vyschihykh uchebnykh zavedeniy*, 2024, 11(776), 79–88. (in Russian)]
- [11] Singh R. et al. CFD modeling to study fluidized bed combustion and gasification, *Applied Thermal Engineering*, 2013, 52(2), 585–614.
- [12] Li Z. et al. Numerical study on the effective utilization of high sulfur petroleum coke for syngas production via chemical looping gasification, *Energy*, 2021, 235, 121395.
- [13] Che X. et al. Numerical study of multi-jet structure impact on flue gas desulfurization process in 3D spouted beds, *Chemical Engineering Journal*, 2023, 457, 141259.
- [14] Wang W. et al. A review of multiscale CFD for gas–solid CFB modeling, *International Journal of Multiphase Flow*, 36(2), 2010, 109–118.
- [15] Gao W. et al. Computational simulation of gas flow and heat transfer near an immersed object in fluidized beds, *Advances in Engineering Software*, 2007, 38(11–12), 826–834.

Theoretical and Applied Heat Engineering  
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: MVDACM

УДК 551.345, 004.942

**Analysis of Thermophysical Properties  
of Cryolithozone Soils Using Data  
of the Vertical Temperature Profile Monitoring**

**Kirill Yu. Litvintsev<sup>a\*</sup>,  
Konstantin A. Finnikov<sup>b</sup> and Tatiana V. Ponomareva<sup>c</sup>**

*<sup>a</sup>Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS  
Novosibirsk, Russian Federation*

*<sup>b</sup>Siberian Federal University  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

*<sup>c</sup>V.N. Sukachev Institute of Forest, SB RAS  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 30.07.2025, received in revised form 27.10.2025, accepted 05.11.2025

**Abstract.** The article presents the methods and results of the study of heat exchange changes during the transformation of the soil of the cryolithozone of the Norilsk industrial region due to anthropogenic impact. The methods are based on the numerical analysis of field measurements. The considered measurements are made in 2023 and 2024 in the two flat tundra sites, the soils of that belong to the type of cryogenic soil most typical for that terrain. The first site presents the natural condition of soil and the second one presents the technogenically transformed condition. The values of the thermal diffusivity coefficients of the studied soils were reconstructed from long-term temperature monitoring data based on the amplitude and phase methods, as well as by solving the inverse problem of heat transfer, and compared with the results of direct measurements in soil sections. The average calculated thermal diffusivity coefficients obtained by all the methods for the soil in the natural conditions have higher values, up to 35 %, compared to the field measurement data. For the transformed area, the calculation by the method based on solving the inverse heat transfer problem shows a match with the field measurement data, and the average values based on the amplitude and phase methods show higher values, by about 25 %. It was found that for the transformed soil, the thermal diffusivity is more than twice as high as for the background soil, which ultimately leads to the observed difference in the depth of soil thawing by 1.5–2 times.

**Keywords:** cryolithic zone, soil, thermal conductivity, mathematical method.

**Acknowledgements.** The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23–14–20007, <https://rscf.ru/project/23-14-20007>, and the Krasnoyarsk Regional Science Foundation.

© Siberian Federal University. All rights reserved

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

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

Citation: Litvintsev K. Yu., Finnikov K. A., Ponomareva T. V. Analysis of Thermophysical Properties of Cryolithozone Soils Using Data of the Vertical Temperature Profile Monitoring. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(8), 1013–1025. EDN: MVDACM



## Анализ теплофизических свойств почв криолитозоны по данным мониторинга вертикального профиля температуры

**К. Ю. Литвинцев<sup>а</sup>, К. А. Финников<sup>б</sup>, Т. В. Пономарёва<sup>в</sup>**

*<sup>а</sup>Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН  
Российская Федерация, Новосибирск*

*<sup>б</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск*

*<sup>в</sup>Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН  
Российская Федерация, Красноярск*

**Аннотация.** Приведены результаты исследования теплообмена в почвах криолитозоны в пределах Норильского промышленного района на основе полевых измерений и методов математического анализа полученных данных. В качестве экспериментальных площадок выбраны фоновые и трансформированные вследствие антропогенного воздействия участки. В работе дана морфогенетическая характеристика почв. По данным долговременного мониторинга температур на основе амплитудного, фазового методов и решения обратной задачи теплопереноса были восстановлены значения коэффициентов теплопроводности исследуемых почв и проведено их сравнение с результатами прямых измерений в почвенных разрезах. Получено, что для трансформированной почвы теплопроводность выше более чем в два раза, чем для фоновой почвы, что согласуется с наблюдаемым различием в 1,5–2 раза для толщины сезонно-талого слоя этих почв.

**Ключевые слова:** криолитозона, почва, теплопроводность, математический анализ.

**Благодарности.** Исследования выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда № 23–14–20007, <https://rscf.ru/project/23-14-20007>, Красноярского краевого фонда науки.

Цитирование: Литвинцев К. Ю. Анализ теплофизических свойств почв криолитозоны по данным мониторинга вертикального профиля температуры / К. Ю. Литвинцев, К. А. Финников, Т. В. Пономарёва // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(8). С. 1013–1025. EDN: MVDACM

### Введение

Широкий интерес к освоению Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) обусловлен как сосредоточенными в ней значительными природными ресурсами, так и стратегическим значением для развития транспортной инфраструктуры и возможностями для социально-экономического развития регионов. При размещении промышленных и инфраструктурных объектов необходимо учитывать возможные риски для экосистем Арктики. Результаты многочисленных наблюдений показывают заметные изменения характеристик экосистем криолитозоны

в последние десятилетия, связанные прежде всего с потеплением климата [1–3]. Эти изменения, в свою очередь, требуют адаптации инфраструктурных объектов и стратегии развития АЗРФ [3, 4]. Масштабное освоение северных территорий может привести к усилению деградации многолетней мерзлоты и изменению всей структуры ландшафтов.

В настоящее время на севере Средней Сибири на территории Таймырского (Долгано-Ненецкого) автономного округа наиболее освоенным является Норильский промышленный район (НПР). Нарушение здесь природного состояния криогенных грунтов в результате антропогенных факторов приводит к изменению их структурных и тепловых свойств, что негативно сказывается на устойчивости экосистем и экологической безопасности. Для решения задач экологического мониторинга возрастает необходимость изучения теплофизических характеристик криогенных почв и разработки методов диагностики и прогнозирования их изменений. Особенно актуально это в связи с ростом числа техногенных аварий и нарушений в зоне вечномерзлых грунтов Таймыра и НПР.

Надежное прогнозирование состояния нарушенных криогенных почв требует выполнения расчетов многомерной динамики тепло- и влагопереноса с применением фундаментальных моделей переноса тепла и влаги. Формулирование моделей невозможно без детальных данных о теплофизических свойствах почв, дифференцированных по горизонтам и заданных в зависимости от удельного влагосодержания. Большое количество таких данных получено и сведено к эмпирическим зависимостям от структуры, состава и влагосодержания [5, 6], однако их применимость в конкретных условиях нарушенной почвы может быть необоснованной. Используемые зависимости должны быть верифицированы результатами измерений, независимо выполненных для почв данной локации. Отдельно говоря о коэффициенте теплопроводности почвы, нужно отметить предпочтительность определения этого свойства в натуральных условиях [7]. При этом использование специализированных приборов для определения теплопроводности осложнено тем, что сенсор прибора неизбежно вносит возмущение в структуру почвы, а также создает локальное возмущение влагосодержания в своей окрестности, что отражается на результатах измерений [8, 9].

Актуальной является задача отработки методов определения коэффициентов теплопроводности (и связанных с ними коэффициентов температуропроводности) в натуральных условиях, свободных от отмеченных факторов погрешностей. Существует широкий класс таких методов, основанных на обработке данных длительного мониторинга температуры почвы, проводимого для набора глубин на данной локации. Установка оборудования для измерения температур на различных глубинах в минимальной степени возмущает температурное поле почвы. В то же время восстановление коэффициентов теплопроводности из данных мониторинга температуры представляет собой сложную задачу, для решения которой существует множество подходов, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки.

Настоящая статья посвящена изучению теплофизических характеристик криогенных почв Норильского промышленного района. Непосредственной задачей исследования является разработка метода восстановления теплофизических свойств почвы путем численной обработки результатов измерений динамики суточных температур почвы на разных глубинах и выявление особенностей свойств грунтов естественных и техногенно-преобразованных почв.

### Объекты и методы исследования

На территории НПП распространены два основных типа ландшафтов: равнинные лесотундровые и тундровые ландшафты, которые характеризуются низкой теплообеспеченностью, повсеместным распространением многолетней мерзлоты, невысокой биологической продуктивностью растений. Почвы НПП криогенные, представляют собой сложную систему с высоким уровнем антропогенного воздействия.

Почвенный покров на исследуемой территории представлен в основном криозёмами, сформированными в условиях вечномёрзлых грунтов, определяя особенности растительности и гидрологических процессов. Поверхностные горизонты криозёмов, торфяные или грубогумусовые, обладают низкой зольностью, высокой пористостью, высоким влагосодержанием, что определяет низкую теплопроводность этих почв.

Натурные данные многодневного мониторинга температур почв были выполнены в 2023 и 2024 гг. на двух равнинных тундровых участках, на которых распространены наиболее характерные для данной территории типы криогенных почв. Первый участок, расположенный вблизи р. Боганиды, соответствует естественному состоянию почвы (участок 1, рис. 1а), второй представляет собой техногенно-трансформированную почву и расположен у р. Амбарная (участок 2, рис. 1б).

Морфогенетическая характеристика почв приведена в табл. 1. Измерения динамики температуры производились контактным методом с использованием измерителей-регистраторов температуры (логгеров) EClerk-M-2Pt, на металлическом зонде которых расположены два датчика измерения температуры на расстоянии между собой 10 см, с 06.08.2023 г. для участка 1 и с 08.09.2024 г. для участков 1 и 2.

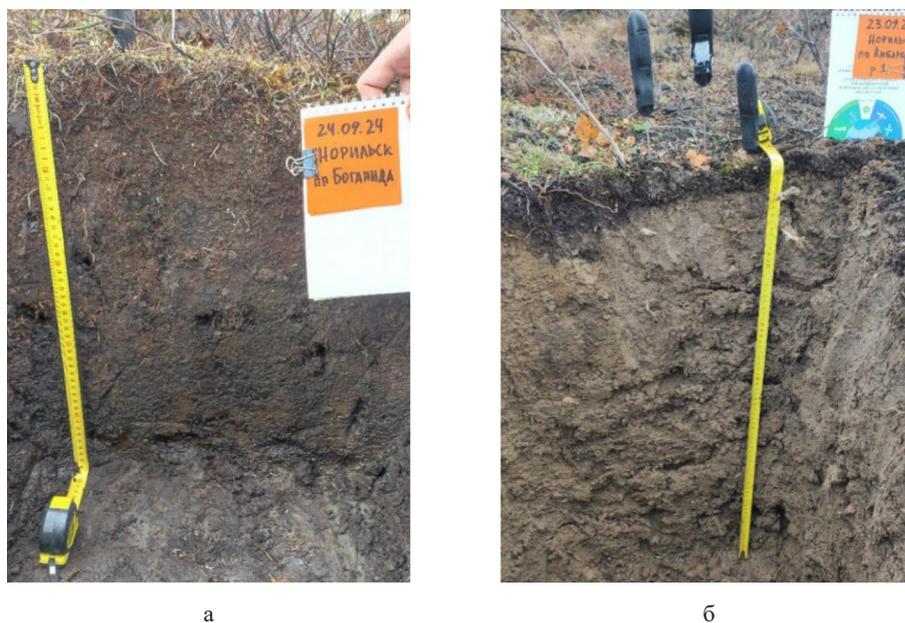


Рис. 1. Почвенные разрезы в местах установки дата-логгеров для измерений температуры, 2024 г.: а) участок 1, фоновая почва; б) участок 2, техногенно-нарушенная почва

Fig. 1. The soil sections near the locations of the temperature loggers installation, 2024: a) the test site 1, intact soil; b) the test site 2, soil under the technogenic impact

Таблица 1. Характеристика криогенных почв в пределах ландшафтов равнинной тундры НПП  
 Table 1. Characterization of the cryogenic soils within the flat tundra landscapes of the Norilsk region

Признаки трансформации экосистемы	Морфологическое описание
Торфяно-криозёмы, р. Боганида, фоновый участок 1	
Нет признаков	Т (0–20 см) – подстильно-торфяной горизонт темно бурого цвета, сложен растительными остатками различной степени разложения. Рыхлое сложение. Влажный. Насыщен корнями кустарничковых и травянистых растений. Граница перехода по цвету, структуре и содержанию органического вещества заметная. CR (20–45) см – криотурбированный, бурый, не дифференцированный, слабооструктуренный, суглинистый горизонт. CR <sub>L</sub> (45–50) см – мерзлый, с включениями жильного льда, не дифференцированный, серовато-бурый, слабооструктуренный, суглинистый горизонт
Криозёмы грубогумусовые, р. Амбарная, нарушенный участок 2	
На участке многочисленные останки погибших древесных и кустарниковых растений. Мохово-лишайниковый покров погиб, сохраняется в виде сухого уплотненного слоя с высоким содержанием минеральных частиц. До 30 % площади участка занято минерализованными медальонами. В напочвенном покрове злаки, хвощ, кустарнички, мхи и лишайники отдельными куртинами в стадии начального восстановления (высота мхов 0,5–1 см)	О (0–5) см – горизонт серо-бурого цвета, сложен растительными остатками различной степени разложения. Уплотнен. С поверхности сухой. Граница перехода по цвету, структуре и содержанию органического вещества заметная. CR (5–55) см – криотурбированный, бурый, тиксотропный, не дифференцированный, слабооструктуренный, суглинистый горизонт. CR <sub>L</sub> (70–80) см – криотурбированный, не дифференцированный, бурый с ржавыми пятнами, слабооструктуренный, суглинистый горизонт

Существуют разнообразные подходы к определению теплофизических свойств почвы на основе измерения временной зависимости температуры на различных глубинах, в отсутствие данных иного рода, таких как плотность теплового потока. В целом они основаны на решении уравнения теплопроводности (1) в различных приближениях.

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где  $C$  – объемная теплоемкость, Дж/м<sup>3</sup>,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м,  $T$  – температура, К.

В основном методы определения температуропроводности основаны на сопоставлении амплитуд и фаз суточных (или годовых) колебаний температуры на различных глубинах [10, 11] либо на аналитических [10, 12] или численных приближениях решения уравнения теплопроводности [13]. Кроме этого, развивается отдельный класс подходов построения моделей теплофизических параметров на основе машинного обучения, связанный с обработкой большого числа экспериментальных данных [14].

Наиболее распространенные методы оценки коэффициента температуропроводности основаны на допущении однородности свойств почвы при гармонической временной зависимости температуры. В этом случае амплитуда колебаний температуры убывает с убыванием

вертикальной координаты, согласно первому закону Фурье, а смещение фазы колебаний определяется вторым законом Фурье. Исходя из первого закона теплопроводность  $a$ , м<sup>2</sup>/с, рассчитывается как (2):

$$a = \frac{\pi}{T} \left( \Delta z / \ln \left( \frac{T_1}{T_2} \right) \right)^2. \quad (2)$$

Исходя из второго – как (3):

$$a = \frac{\pi}{T} \left[ \frac{\Delta z}{\Delta \Phi} \right]^2, \quad (3)$$

где  $\Delta z$  – разница по глубине между точками измерения температур, м;  $T_1$  и  $T_2$ , – амплитуды колебаний температуры в верхней и нижней точках, К; значения  $\Delta \Phi$  – смещение фазы колебаний по глубине, рад;  $T$  – период колебаний, с.

Данные методы перестают корректно работать в условиях, когда временные зависимости температуры далеки от периодических, кроме этого, полученные значения теплопроводности зачастую могут заметно различаться в зависимости от выбора конкретных данных измерений, используемых для расчетов, из всего массива данных.

В этих условиях применимы методы более общего характера, развиваемые как частный случай методов решения обратных задач теплопереноса. В настоящем исследовании использовался подход, близкий к развитому в [15].

В общем случае задача определения теплофизических свойств среды по известным временным зависимостям температуры в некоторых точках является обратной задачей теплопереноса. В условиях данной работы постановка обратной задачи является следующей. Дан набор координат  $N$  точек измерения  $z_i$ :  $z_1 > z_2 > \dots > z_N$ , и для каждой из точек известна измеренная зависимость температуры от времени  $T_i^{\text{измер}}(t)$ . Решая уравнение теплопроводности (1) в области  $z_1 > z > z_N$  с заданными условиями первого рода на границах, соответствующих измеренным температурам, требуется определить зависимости коэффициентов уравнения от координаты и времени,  $\lambda(z, t)$ ,  $C(z, t)$ , такие, что достигается минимум величины:

$$\sum_{i=2}^{N-1} \int (T(z_i, t) - T_i^{\text{измер}}(t))^2 dt. \quad (4)$$

Интегрирование ведется по рассматриваемому временному интервалу. Минимально возможное количество точек – 3, и в этом случае в качестве граничных, для которых величина температуры задается в соответствии с измеренными временными зависимостями, рассматриваются первая и третья, а для второй точки производится минимизация интегрального квадратичного отклонения решения уравнения теплопроводности от измеренной температуры.

Выбран следующий метод решения описанной задачи. Весь интервал времени, в течение которого проводились измерения, разделен на интервалы длиной, равной суткам. Интервалы рассматриваются последовательно, и для каждого из них решается задача определения коэффициентов уравнения теплопроводности, которые считаются неизменными в пределах каждого интервала координаты.

Таким образом, задача определения  $\lambda(z, t)$ ,  $C(z, t)$  сводится к отдельным задачам поиска минимума функции (4). Начальное распределение температуры в первом суточном интервале задается путем линейной интерполяции данных измерений.

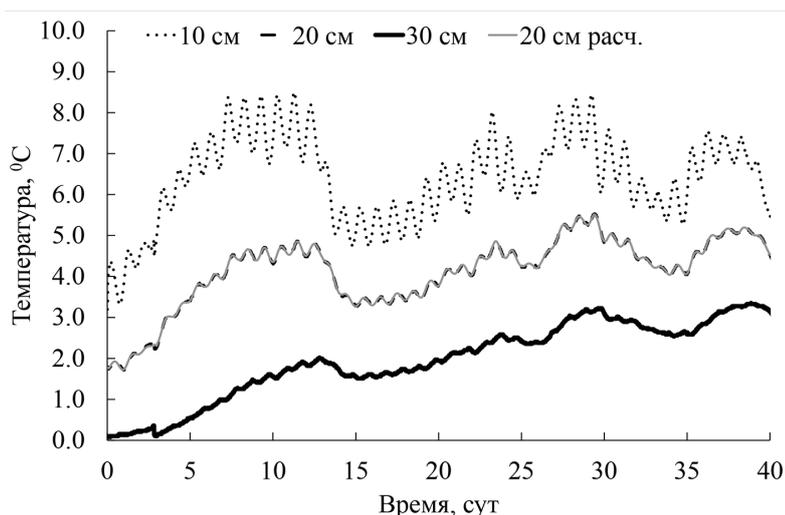


Рис. 2. Суточный ход температур почвы на участке 1 (вблизи р. Боганиды), 2024 г. Данные натуральных наблюдений и расчетная температура при восстановлении коэффициента температуропроводности

Fig. 2. Daily variation of soil temperatures in the test site 1 (near the Boganida River), 2024. Field observation data and calculated temperature with the reconstructed the thermal diffusivity coefficient

На рис. 2 представлена для участка 1, 2024 г., динамика температур на глубинах 10, 20 и 30 см и рассчитанная температура на глубине 20 см в результате подбора значений  $\lambda(z, t)$ ,  $C(z, t)$  для минимизации функции (4).

Одной из особенностей почв данных участков является сохранение достаточно влагонасыщенного состояния в течение практически всего летнего периода, что предполагает меньшие колебания температуропроводности из-за изменения влажности почв. Для сопоставления рассчитанных данных приведены результаты полевых измерений температуропроводности с помощью прибора «ТЕМПОС» Thermal Properties Analyzer (METER Group, USA) с использованием двух игольчатых шупов SH-3 (табл. 2). В данном приборе одна из игл является источником тепла, а на второй измеряется температура, далее коэффициент температуропроводности рассчитывается на основе решения обратной задачи теплопроводности.

Таблица 2. Осредненные данные полевых измерений прибором «ТЕМПОС» значений коэффициента температуропроводности

Table 2. Averaged data of field measurements of the thermal diffusivity coefficient values using the TEMPOS meter device

Участок, год	1, 2024	2, 2024	2, 2024
Почвенный слой	10–30 см	0–5 см	10–30 см
$\langle a \rangle \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$ (число измерений)	0,14 (4)	0,14 (2)	0,4 (6)

### Результаты обработки многодневной динамики измерений температуры

Длительный период наблюдений динамики температуры на разных глубинах позволил обработать данные на основе преобразования Фурье (рис. 3, 4). Из результатов преобразования видно, что вблизи поверхности существуют две основные моды: высокочастотная мода, соответствующая суточному циклу, и низкочастотная, соответствующая колебаниям среднесуточной температуры в ходе текущего летнего периода. Наблюдаемое отклонение от 24 часов связано с дискретным шагом по частотам быстрого преобразования Фурье. С увеличением глубины амплитуда суточной моды падает, в том числе и относительно более низкочастотных мод, особенно это заметно для участка 1. Кроме того, для данного участка в торфяном горизонте на глубине 20 см даже наблюдаются небольшие колебания суточной амплитуды около 24-часового периода для 2023 и 2024 гг. Для участка 2 с нарушенной почвой остается доминирующей суточная мода на глубине 20 см, вплоть до моды, соответствующей 4 суткам. Это связано с тем, что торфяной горизонт отличается высокой пористостью и неоднородностью структуры, в то же время для трансформированного участка под небольшим органомогенным верхним слоем (примерно до 10 см) на глубине 20 см расположен криотурбированный суглинистый горизонт, имеющий меньшую пористость и большую однородность. Наибольшие ам-

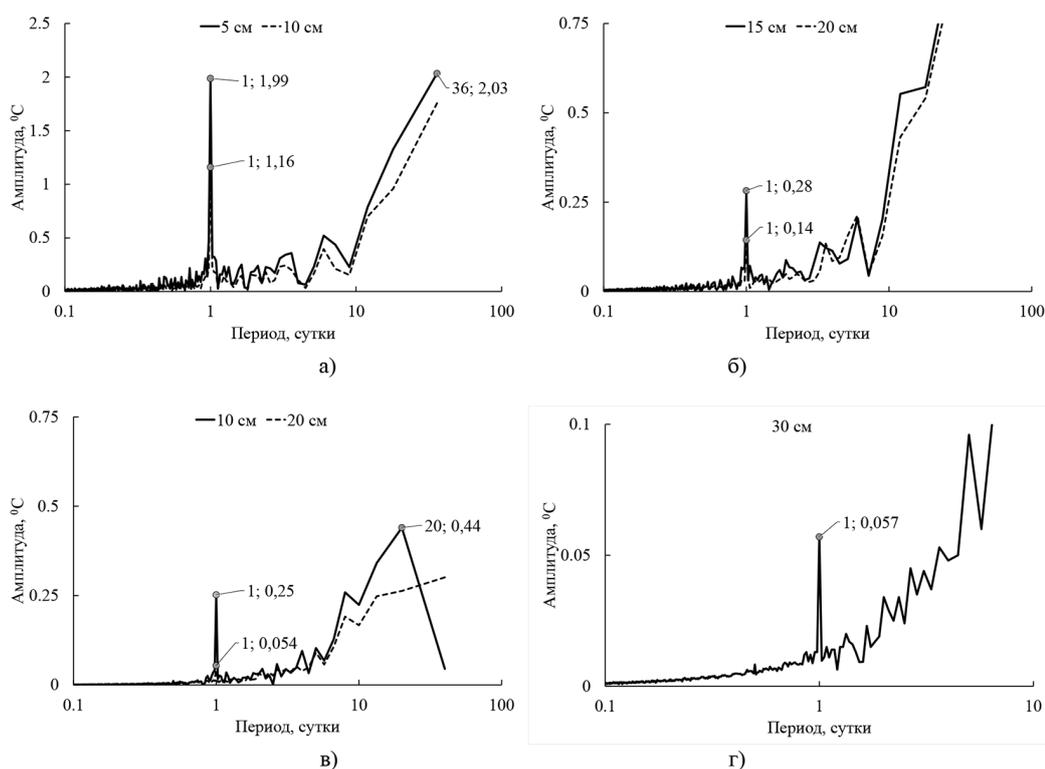


Рис. 3. Зависимость амплитуды от периода колебаний, полученная при разложении натуральных данных динамики температуры на участке 1 в ряд Фурье, на глубинах: а) 5 и 10 см, 2023 г.; б) 15 и 20 см, 2023 г.; в) 10 и 20 см, 2024 г.; г) 30 см, 2024 г.

Fig. 3. The result of the Fourier transform of the temperature time dependencies obtained in the test site 1, depths of: а) 5 and 10 cm, 2023; б) 15 and 20 cm, 2023; в) 10 and 20 cm, 2024; г) 30 cm, 2024

плитуды, соответствующие примерно месячному периоду для 2023 г. и полумесячному для 2024 г., связаны с колебаниями среднесуточной температуры, которые, например, хорошо видны из данных натуральных наблюдений для участка 1 в 2024 г. (рис. 3). Данные периоды соответствуют только конкретно текущим проведенным наблюдениям и не имеют обоснованного систематического характера.

Полученные характеристики преобразования Фурье были использованы для расчета усредненных коэффициентов температуропроводности с помощью амплитудного (2) и фазового (3) методов (табл. 3) на основе парных данных измерений температур, произведенных одним дата-логгером. Отношения амплитуд и разности фаз колебаний температур в формулах (2) и (3) соответствуют значениям реальной и мнимой частям комплексной амплитуды температуры для суточной моды, полученной при разложении в ряд Фурье соответствующих данных (рис. 3, 4). Использование данных Фурье-разложения позволяет получить усредненное значение коэффициента температуропроводности для исследуемых почв криолитозоны, что особенно оправдано в условиях доминирующего переувлажненного состояния почв в летний период, которое приводит к относительному постоянству теплопроводящих свойств почв.

Для распространяющихся в идеальных условиях гармонических колебаний, в данном случае температур, результаты на основе амплитудного и фазового метода должны совпадать. В рассматриваемом случае расхождения в значениях температуропроводности колеблются примерно от 1,5 до 5 раз. При этом наибольшие расхождения наблюдаются в переходных областях из одного почвенного горизонта в другой: в 5 раз на участке 1 (2024), на глубине 20 см – 30 см переход от торфяной к минеральной суглинистой почве; в 3 раза на участке 2, на глубине 5 см расположена граница органогенного горизонта (табл. 1). Кроме этого, можно отметить, что на участке 1 для 2024 г. происходит более быстрое затухание сигнала по сравнению с 2023 г. (рис. 3). В целом видно, что на участке 1 на глубине 5–20 см получаются близкие средние значения температуропроводности  $0,14\text{--}0,19\cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$ , что согласуется с морфологическими и физико-химическими характеристиками почвенного профиля. Результаты расчета по слою 20–30 см показывают слишком большое расхождение для возможности использования

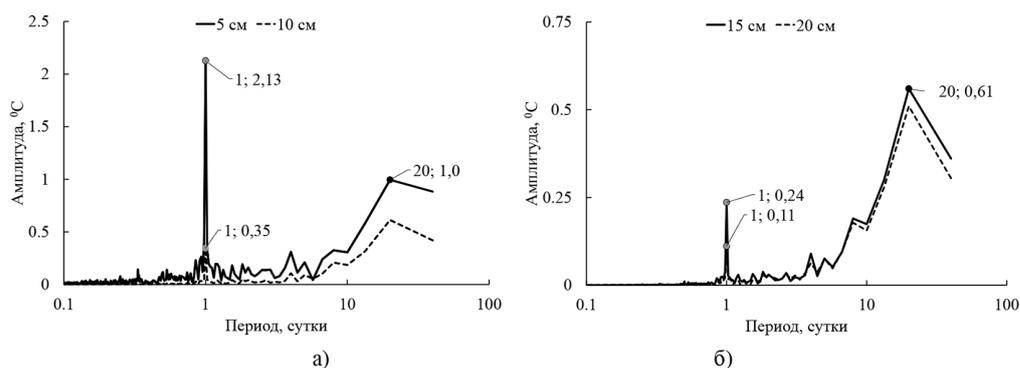


Рис. 4. Зависимость амплитуды от периода колебаний, полученная при разложении натуральных данных динамики температуры на участке 2 (2024 г.) в ряд Фурье, на глубинах: а) 5 и 10 см, 2024 г.; б) 15 и 20 см, 2024 г.

Fig. 4. The result of the Fourier transform of the temperature time dependencies obtained in the test site 2 in 2024, depths of: а) 5 and 10 cm; б) 15 and 20 cm

полученных значений. Для участка 2 наиболее интересен почвенный слой 10–20 см, так как он находится в рамках одного минерального суглинистого почвенного горизонта. Как видно, в техногенно-нарушенной криотурбированной почве теплопроводность растет в 2,5–3 раза по сравнению с фоновой почвой, за исключением тонкого верхнего органического слоя.

На основе полученных данных были проведены расчеты для восстановления усредненных коэффициентов теплопроводности для почвенных горизонтов на основе решения обратной задачи теплопроводности. Для участка 1, (2023 г.) была получена динамика коэффициентов теплопроводности для почвенного слоя 10–20 см на основе минимизации разницы температур расчетной и измеренной на глубине 15 см; для участков 1 и 2, (2024 г.) – для почвенного слоя 10–30 см на основе минимизации разницы температур на глубине 20 см (рис. 5). Наблюдаемая средняя разница расчетной и измеренной температур составляет 0,08 (участок 1, 2023 г.), 0,018 (участок 1, 2024 г.) и 0,04 °С (участок 2). Полученные данным методом средние значения теплопроводности представлены в табл. 3. Для участка 1 расчеты на основе многодневных измерений температуры, сделанные с годовым перерывом, показывают практически одинаковый результат. Для участка 2 в суглинистом горизонте наблюдается рост теплопроводности почти в 2,5 раза по сравнению с фоновой почвой, который согласуется с полученным ранее результатом. В целом можно отметить, что рассчитанные средние значения коэффициентов теплопроводности находятся в пределах значений, полученных на основе амплитудного и фазового методов (табл. 3).

Если рассматривать динамику изменений коэффициента теплопроводности (рис. 5), то для участка 1 изменения находятся в интервале  $0,12–0,25 \cdot 10^{-6}$ , а для 2 –  $0,27–0,5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Наблюдаемые скачки коэффициентов связаны с достаточно резким изменением температуры, так, для участка 1 (2024 г.) на 15 и 30 сутки происходит заметное снижение амплитуд изменения температур на глубине 10 см (рис. 2), которое приводит к провалу численных значений теплопроводности. Исключение подобных значений изменит среднее значение коэффициента с 0,17 до  $0,18 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

Полученные расчетным методом средние коэффициенты теплопроводности для всех используемых методов в сравнении с данными полевых измерений по участку 1 имеют

Таблица 3. Рассчитанные значения коэффициента теплопроводности

Table 3. The calculated values of thermal diffusivity

Амплитудный (2) и фазовый (3) методы						
Участок, год	1, 2023	1, 2023	1, 2024	1, 2024	2, 2024	2, 2024
Почвенный слой	5–15 см	10–20 см	10–20 см	20–30 см	5–15 см	10–20 см
a·10 <sup>6</sup> , м <sup>2</sup> /с (2)/(3)/ среднее	0,14/ 0,25/ 0,195	0,12/0,17/ 0,145	0,23/0,13/ 0,18	1,24/0,25 0,745	0,11/0,3/ 0,205	0,41/0,615/ 0,513
Решение обратной задачи теплопроводности						
Участок, год	1, 2023		1, 2024		2, 2024	
Почвенный слой	10–20 см		10–30 см		10–30 см	
<a>·10 <sup>6</sup> , м <sup>2</sup> /с	0,17		0,17		0,39	

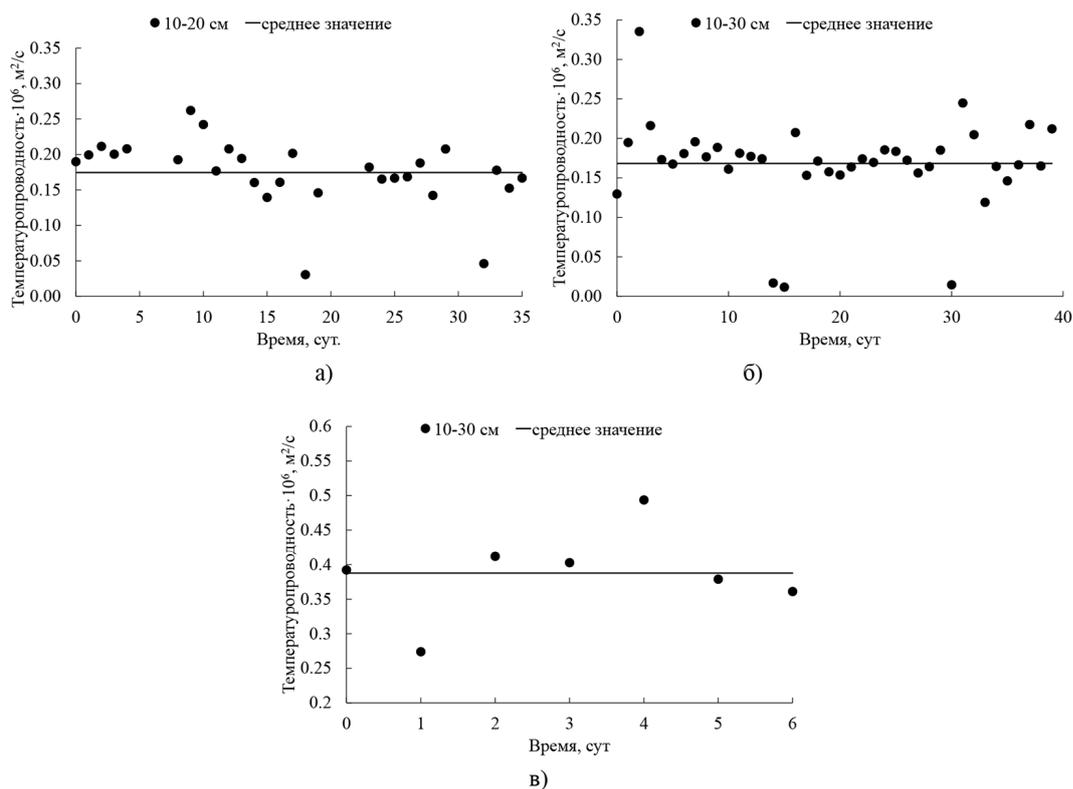


Рис. 5. Рассчитанные коэффициенты температуропроводности: а) для участка 1, 2023 г.; б) для участка 1, 2024 г.; в) для участка 2, 2024 г.

Fig. 5. The calculated values of thermal diffusivity: a) the test site 1, 2023; b) the test site 1, 2024; c) the test site 2, 2024

более высокие значения, до 35 % (исключая значения для 20–30 см, табл. 3). С учетом возможной погрешности измерений самим прибором в почвенном горизонте, имеющем высокую пористость, можно считать результаты достаточно близкими. Для участка 2 с более тяжелой и плотной почвой расчет методом, основанным на решении уравнения теплопроводности, практически совпадает с данными полевых измерений, а среднее значение на основе амплитудного и фазового методов показывает более высокие показатели, примерно на 25 %. Стоит также отметить, что при использовании методов (2) и (3) нельзя априори сказать, какой из них даёт более точный результат, поэтому необходимо использовать среднее значение.

Если рассматривать полученные результаты в совокупности, то для техногенно-трансформированной почвы (участок 2) температуропроводность выше более чем в два раза, чем для фоновой почвы (участок 1), что в итоге приводит к наблюдаемой разнице глубины растепления почв в 1,5–2 раза [16].

### Заключение

Исследуемые почвы криолитозоны, распространенные в районе Норильского промышленного района, при техногенной трансформации могут претерпевать серьезные структурные изменения, которые приводят к изменению теплового режима и функционирования почв в це-

лом. Это, в свою очередь, определяет такие важные характеристики для инфраструктурных объектов и биологических систем, как глубина растепления и скорость движения границы фазового перехода вода/лед.

На основании данных мониторинга температуры почвы показано, что в природных условиях показатели теплофизических свойств почв не остаются постоянными. В исследуемых почвах трансформация верхнего органогенного горизонта приводит к изменению коэффициента температуропроводности в 2,5–3 раза. Сравнение результатов прямых полевых измерений и обработки данных многодневной динамики температуры различных почвенных слоев демонстрирует в целом хорошее согласование. Но в случае использования амплитудного и фазового метода такое согласование наблюдается только при совместном осреднении значений, полученных обоими подходами, так как температурные колебания не являются идеальными гармоническими. Для третьего метода при расчете могут наблюдаться скачки коэффициента температуропроводности, возникающие при достаточно резком изменении температуры на верхней границе рассматриваемого слоя. Это говорит о том, что в данном случае модель не работает, и, возможно, в почве реализуются другие механизмы переноса тепла, отличные от теплопроводности.

Восстановленные коэффициенты температуропроводности на основе решения обратной задачи теплопроводности подтверждают предположение о сохранении высокого увлажнения почвы в течение летнего периода.

Представленные в статье результаты могут быть использованы при разработке моделей тепло- и влагопереноса, в том числе для нарушенных почв, расположенных в НПП.

#### Список литературы / References

[1] Лавров С. И. Воздействие климатических изменений на сезонное протаивание и водный режим почвогрунтов зоны вечной мерзлоты. *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*, 2022, 4, 66–85 [Lavrov S. A. The impact of climate change on seasonal thawing and water regime of soils in the permafrost zone. *Water sector of Russia: problems, technologies, management*, 2022, 4, 66–85 (in Russian)]

[2] Анисимов О. А., Шерстюков А. Б. Оценка роли природно-климатических факторов в изменениях криолитозоны России. *Криосфера Земли*, 2016, XX(2), С. 90–99 [Anisimov O. A., Sherstiukov A. B. evaluating the effect of environmental factors on permafrost in Russia. *Earth's Cryosphere*, 2016, XX(2), 90–99. (in Russian)]

[3] Макоско А. А., Матешева А. В. К оценке экологических рисков от загрязнения атмосферы Арктической зоны в условиях изменяющегося климата в XXI в. *Арктика: экология и экономика*, 2022, 12(1), 34–45 [Makosko A. A., Matesheva A. V. On the assessment of environmental risks from air pollution in the Arctic zone under a changing climate in the XXI century. *Arctic: Ecology and Economy*, 2022, 12(1), 34–45 (in Russian)]

[4] Васильцов В. С., Яшалова Н. Н., Новиков А. В. Климатические и экологические риски развития прибрежных арктических территорий. *Арктика: экология и экономика*, 2021, 11(3), 341–352 [Vasil'tsov V. S., Yashalova N. N., Novikov A. V. Climate and environmental risks in the development of Arctic coastal territories. *Arctic: Ecology and Economy*, 2021, 11(3), 341–352 (in Russian)]

- [5] He H., Flerchinger G.N., Kojima Y., Dyck M., Lv J. A review and evaluation of 39 thermal conductivity models for frozen soils. *Geoderma*, 2021, 382, 114694
- [6] Dong Y., McCartney J.S., Ning L. Critical review of thermal conductivity models for unsaturated soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2015, 33, 207–221
- [7] Schjønning P. Thermal conductivity of undisturbed soil – measurements and predictions. *Geoderma*, 2021, 402, 115188.
- [8] Yu M., Sui X., Peng X., Fang Z. Influence of moisture content on measurement accuracy of porous media thermal conductivity. *Heat Transfer – Asian Research*, 2009, 38(8), 492–500.
- [9] Feng M., Fredlund D.G. Hysteretic influence associated with thermal conductivity sensor measurements. *Conference: 52nd Canadian Geotechnical Conference*. At: Regina Saskatchewan Canada, 1999, 14(2). 651–657
- [10] Wang L., Gao Z., Horton R. Comparison of Six Algorithms to Determine the Soil Apparent Thermal Diffusivity at a Site in the Loess Plateau of China. *Soil Science*, 2010, 175(2), 51–60
- [11] Gnatowski T. Analysis of thermal diffusivity data determined for selected organic topsoil layer. *Land Reclamation*, 2009, 41, 95–107
- [12] Архангельская Т.А. *Температурный режим комплексного почвенного покрова*. М.: ГЕОС, 2012. 284. [Arkhangelskaya T.A. *Temperature regime of the complex soil cover*, Moscow, GEOS, 2012, 284. (in Russian)]
- [13] Ioannidis T., Bakas N. An Analytical Solution for the Heat Conduction–Convection Equation in Non-homogeneous Soil. *Boundary-Layer Meteorology*, 2023, 186, 199–216
- [14] Li. K., Horton R., He H. Application of machine learning algorithms to model soil thermal diffusivity. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023, 149, 107092.
- [15] Karashbayeva Z., Berger J., Orlande H.R.B., Rysbaiuly B. Estimation of ground thermal diffusivity using the conjugate gradient method with adjoint problem formulation. *Urban Climate*, 2023, 52, 101676.
- [16] Ponomareva T.V., Litvintsev K. Yu., Finnikov K.A., Yakimov N.D., Sentyabov A.V., Ponomarev E.I. Soil Temperature in Disturbed Ecosystems of Central Siberia: Remote Sensing Data and Numerical Simulation. *Forests*, 2021, 12, 994.

**Theoretical and Applied Heat Engineering**  
**Теоретическая и прикладная теплотехника**

EDN: JPTUJY

УДК 614.843.2:62–758.364:621.578

**Application of a Thermal Insulation Cover Using  
the Rank-Hilsh Effect in Firefighting Practice**

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

Received 15.10.2025, received in revised form 25.10.2025, accepted 06.11.2025

**Abstract.** When extinguishing fires, when the ambient air temperature drops to  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  and below, there is a risk of freezing of fire equipment, which significantly complicates the work of emergency services. A method of insulating a sleeve branch in conditions of low temperatures is proposed, which consists in using a special thermal insulation cover and supplying a hot air flow from a Rank-Hilsh vortex tube, which uses the energy separation effect after supplying compressed air from the engine of a fire truck.

**Keywords:** thermal insulation cover, Rank-Hilsh tube, Rank-Hilsh effect, sleeve branching.

Citation: Gafurov M. M., Kulagina T. A. Application of a Thermal Insulation Cover Using the Rank-Hilsh Effect in Firefighting Practice. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(8), 1026–1035. EDN: JPTUJY



**Применение теплоизоляционного чехла  
с использованием эффекта Ранка-Хилша  
в практике тушения пожаров**

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

**Аннотация.** При тушении пожаров, когда температура окружающего воздуха опускается до  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже, возникает риск замерзания пожарного оборудования, что существенно осложняет работу экстренных служб. Предложен способ утепления рукавного разветвления в условиях

© Siberian Federal University. All rights reserved

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

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

низких температур, заключающийся в использовании специального теплоизоляционного чехла и подвода горячего потока воздуха от вихревой трубки Ранка-Хилша, в которой используется эффект энергоразделения после подачи сжатого воздуха от двигателя пожарного автомобиля.

**Ключевые слова:** теплоизоляционный чехол, трубка Ранка-Хилша, эффект Ранка-Хилша, рукавное разветвление.

Цитирование: Гафуров М. М. Применение теплоизоляционного чехла с использованием эффекта Ранка-Хилша в практике тушения пожаров / М. М. Гафуров, Т. А. Кулагина // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(8). С. 1026–1035. EDN: JPTUJY

## Введение

Одними из главных задач при тушении пожаров является спасение людей, имущества и ликвидация пожара. Началом боевых действий по тушению пожаров принято считать момент получения сигнала (сообщения) о пожаре, а окончанием – момент восстановления боеготовности подразделения пожарной охраны к тушению пожара и проведению аварийно-спасательных работ.

В зимний период на большей территории России и в течение более длительного периода на территории Крайнего Севера тушение пожаров осложняется низкими температурами. При подобных условиях особенно уязвимыми являются металлические устройства пожарного оборудования.

Исследования, проведенные при выполнении данной работы, являются актуальными, так как предложенный авторами способ позволяет поддерживать указанные устройства в работоспособном состоянии до температуры окружающего воздуха  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже, что гарантированно обеспечит бесперебойную подачу огнетушащих веществ при тушении пожаров. Внедрение новых устройств позволяет повысить эффективность пожаротушения в условиях Крайнего Севера, при транспортной труднодоступности, за счет снижения рисков замерзания элементов пожарного оборудования и, соответственно, простоев в работе насосно-рукавных систем.

## Методы и принципы исследования

Для решения проблемы утепления и обогрева элементов пожарного оборудования были изучены и проанализированы ранее предложенные способы. Так, для теплоизоляции при пожаротушении пожарные соединения и разветвления предлагалось засыпать снегом или древесными опилками или использовать другие, так называемые пассивные методы утепления. Группа авторов, в том числе С. О. Куртов [1], рекомендуют применение компактных раскладных устройств с использованием открытого огня паяльной лампы. Однако эти меры малоэффективны и неудобны, а использование паяльной лампы, когда трудно контролировать температурные параметры металлического узла, сильно осложняет процесс подогрева устройства, и поэтому возможен чрезмерный его перегрев.

Авторами статьи для обогрева элементов пожарного оборудования был разработан метод использования съемного теплоизоляционного чехла и специального устройства на базе вихревой трубки Ранка-Хилша [2, 3]. Для исследования использовали рукавное разветвление РТ-80, которое является элементом пожарно-технического вооружения для распределения потока воды из магистральной в рабочие линии. Это трехходовое разветвление может работать одновременно с тремя или меньшим количеством выкидных рукавных линий.

В лаборатории Сибирского федерального университета был изготовлен съемный теплоизоляционный чехол для РТ-80, точно повторяющий его форму, состоящий из нескольких слоев (рис. 1). При этом использовались следующие материалы: для верхнего слоя износостойкая ткань, для второго – теплоизоляционный материал, для третьего – непромокаемый материал. Полученный чехол испытывался как отдельное устройство, так и совместно с вихревой трубкой, при температурах  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже. Конструкция созданного узла для повышения эффективности теплообмена при помощи энергоразделения в вихревой трубке Ранка-Хилша позволила получить без дополнительных затрат поток воздуха с регулируемой температурой вплоть до  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

С момента изобретения вихревой трубы было предложено несколько объяснений энергетического разделения потоков [4]. К причинам разделения могут относиться градиент давления внутри вихревой трубки, внутреннее трение и трение между рабочей средой и внутренней стенкой трубки, турбулентность рабочей среды, статический температурный градиент, вторичная циркуляция и акустическое течение [5]. В [6] обосновано, что адиабатическое сжатие и расширение, вызванное турбулентными вихрями, составляют основу температурного разделения и дают теоретическое обоснование разделения температур на основе давлений на выходах устройства.



Рис. 1 Теплоизоляционный чехол на разветвление РТ-80

Fig. 1. Thermal insulation cover for the RT-80 branch

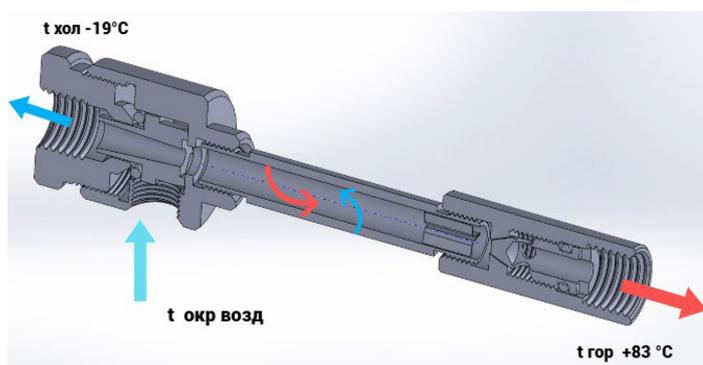


Рис. 2. Вихревая трубка в разрезе

Fig. 2. Vortex tube section

В [4] представлено новое объяснение образования горячих и холодных потоков в вихревой трубке, основанное на частичной стагнации и смешении, что обусловлено природой многоконтурной циркуляции, происходящей в задней части устройства и градиентом давления вблизи инжекционного отверстия. Это объяснение было впервые выдвинуто в ходе критического обзора предыдущих гипотез [5], а затем проработано в ходе серии экспериментальных исследований [7–8].

Разъяснение охлаждающего эффекта подтверждается соответствием между предполагаемой и экспериментально наблюдаемой структурой течения. Визуализация структуры течения внутри вихря, работающего на воде, проводилась с использованием различных методов предоставления [8]. Детальное описание структуры течения основывалось на наблюдаемых движениях инжесктурированных трассирующих частиц в прозрачной трубке [8]. С помощью трассирующих частиц было обнаружено, что внутренняя часть инжесктурированной жидкости возвращалась в исходное положение, перемещаясь к холодному концу, и выходила через холодное отверстие.

Аналитический анализ свойств потока в вихревой трубке, работающей на воздухе, показывает, что в горячей области вихревой трубы отсутствует передача энергии и температуры наружу (рис. 3). Кроме того, определяющим фактором повышения температуры являются застой и перемешивание структуры потока. Важно отметить, что поскольку вихревая труба не содержит дополнительных частей внутри, то разделение двух потоков с разной температурой может быть объяснено только эффектами аэро- или гидродинамики.

Существуют различные конструкции вихревых трубок. А. П. Меркулов подробно описал работу этих трубок с искривленной геометрией [9]. Наряду с подобными трубками, прямые также имеют много разновидностей, что позволяет выбрать устройство для решения конкретных задач [10, 11].

Результаты проведенного численного моделирования процесса разделения температуры входящего потока внутри вихревой трубки показаны на рис. 3. Принцип, согласно которому

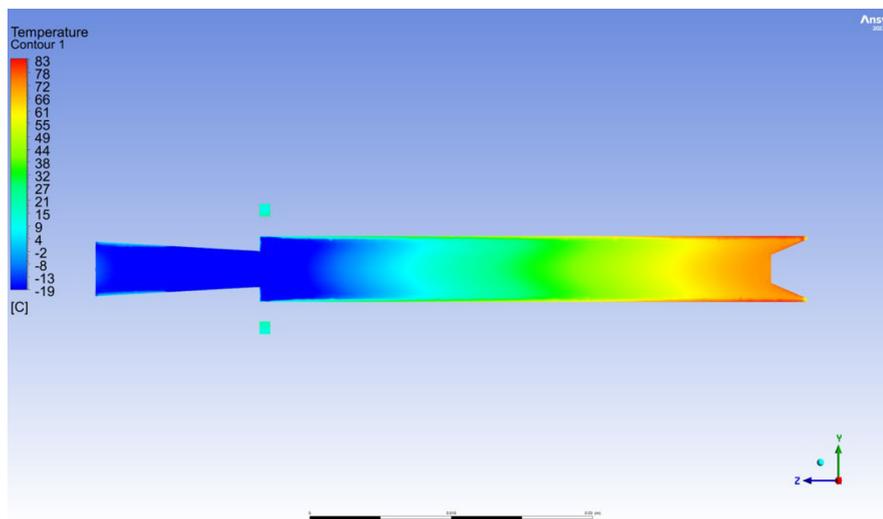


Рис. 3. Распределение температуры воздуха в вихревой трубке

Fig. 3. Air temperature distribution in a vortex tube

в данном случае можно объяснить разделение температур, заключается в следующем: когда сжатый воздух подается в трубку тангенциально через входное отверстие, он образует сильно завихренный поток и продвигается к концу трубы. Внутренняя часть потока движется к горячему концу и возвращается в исходное положение в передней части устройства. Эта часть потока расширяется из-за низкого давления в центральной части трубы и выходит из холодного сопла при более низкой температуре, чем вдуваемый воздух. Небольшая часть внутреннего потока смешивается с многоциркуляционным потоком и образует небольшие вихри, которые разделяют холодный и сложнотурбулентный потоки. Из-за градиента давления в вихревой трубке самая низкая температура будет наблюдаться в центральной части потока вблизи инжекционного отверстия. После смешивания с другим потоком, который был повернут обратно внутрь, минимальная температура выходящего потока из холодного сопла окажется выше, чем самая низкая температура внутри трубы.

Для моделирования применялась вычислительная программа (ANSYS CFX), использующая метод конечных объемов (FVM), то есть область исследования разделяется на ячейки, и каждая ячейка подчиняется трем фундаментальным уравнениям гидродинамики, также называемым усредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса (RANS), которые определяют баланс массы, импульса и энергии потока, проходящего через каждую ячейку.

Полученные результаты распределения температур в устройстве приведены на рис. 3. Задача решалась в 2D-осесимметричной вихревой постановке в модели RNG k-ε (+SDF). В ANSYS-CFX для моделирования турбулентности k-ε используется подход масштабируемых пристеночных функций для повышения надежности и точности при очень мелкой сетке у стенки. Масштабируемые пристеночные функции позволяют проводить моделирование на произвольно мелких сетках у стенки, что является значительным улучшением по сравнению со стандартными пристеночными функциями. В то время как стандартные модели с двумя уравнениями обеспечивают хорошие прогнозы для многих потоков, представляющих инженерный интерес, k – это кинетическая энергия турбулентности, определяемая как дисперсия флуктуаций скорости; ε – это диссипация турбулентных вихрей (скорость, с которой рассеиваются флуктуации скорости), имеющая размерность в единицу времени. Модель k-ε вводит две новые переменные в систему уравнений.

Кинетическая энергия турбулентности k и скорость ее диссипации ε получают из следующих уравнений переноса [10]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(pk) + \frac{\partial}{\partial x_i}(pk u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - p\varepsilon - Y_M + S_k, \quad (1)$$

где  $p$  – плотность потока;  $k$  – кинетическая энергия турбулентности;  $u$  – скорость потока;  $\mu$  – динамическая вязкость;  $\sigma$  – турбулентное число Прандтля;  $\sigma_k$  – турбулентное число Прандтля для  $k$ ;  $G_k$  – генерация кинетической энергии турбулентности;  $G_b$  – генерация кинетической энергии турбулентности за счет плавучести;  $\varepsilon$  – скорость рассеивания турбулентности;  $Y_M$  – вклад флуктуирующего расширения в общую скорость диссипации;  $S_k$  – источник кинетической энергии турбулентности.

$$\frac{\partial}{\partial t}(p\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(p\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}) \partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k(G_k + C_{3\varepsilon} G_b)} - \frac{C_{2\varepsilon} p \varepsilon^2}{k} + S_k, \quad (2)$$

где  $\sigma_\varepsilon$  – турбулентное число Прандтля для  $\varepsilon$ ;  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $C_{3\varepsilon}$ , – константы.

Турбулентная (или вихревая) вязкость  $\mu_t$  вычисляется путем комбинации  $k$  и  $\varepsilon$  следующим образом:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (3)$$

Моделирование описанного сложного процесса в программе ANSYS показало, что температура потоков слева и справа имеет значения соответственно  $-19$  и  $+83$  °С.



Рис. 4. Натурный этап проведения измерений

Fig. 4. Natural stage of measurements

#### Анализ исследования

Для проверки характеристик чехла и всего устройства были произведены математические расчеты, которые доказывают их эффективность. Тепловые потери от неизолированного вентиля или задвижки принимаются равными тепловым потерям изолированного трубопровода длиной  $l_3 = 12-24$  м того же диаметра [12]. Эквивалентную длину изолированного на 3/4 поверхности вентиля или задвижки в зависимости от диаметра трубопровода и температуры теплоносителя можно принимать равной 4–8 м изолированного трубопровода.

Теплопотери рассчитывались при температурах окружающего воздуха  $-20$  и  $-30$  °С вначале для неизолированного разветвления, затем РТ-80, помещенного в теплоизоляционный чехол, и третий вариант – к узлу подключали еще и вихревую трубку.

Для расчетов использована формула для однослойной плоской стенки из СП 61.13330.2012 В.1 – Расчетные формулы стационарной теплопередачи в теплоизоляционных конструкциях (табл. 1):

$$q_F = \frac{t_B - t_H}{R_{вн} + R_{ст} + R_{из} + R_H} \quad (4)$$

где  $q_F$  – поверхностная плотность теплового потока через плоскую теплоизоляционную конструкцию, Вт/м;  $t_B$  – температура среды внутри изолируемого объекта, °С;  $t_H$  – температура окружающей среды, °С;  $R_{вн}$  – сопротивление теплоотдаче на внутренней поверхности стенки изолируемого объекта, м °С/Вт;  $R_H$  – то же на наружной поверхности теплоизоляции, м °С/Вт;  $R_{ст}$  – термическое сопротивление стенки изолируемого объекта, м °С/Вт;  $R_{из}$  – то же плоского слоя изоляции, м °С/Вт.

Для получения экспериментальных данных эффективности работы устройства при нескольких значениях температур окружающей среды (–20 и –30 °С) измерялась температура на поверхности РТ-80 (разветвление трехходовое) в следующих вариантах: без применения чехла, с применением теплоизоляционного чехла (рис. 5) и с применением теплоизоляционного чехла и вихревой трубки. В ходе испытаний на практике опытные образцы показали свою эффективность, как сам теплоизоляционный чехол, так и устройство в целом. При проведении физического эксперимента был использован тепловизор Testo 885–2 (табл. 2).

Таблица 1. Результаты расчета теплотеря при  $t$  воды +6 °С

Table 1. Results of heat loss calculation at  $t$  water +6 °С

Варианты конструкции пожарного разветвления:	При температурах окружающего воздуха	
	–20 °С	–30 °С
без теплоизоляционного чехла	71,88 Вт	99,53 Вт
с теплоизоляционным чехлом	15,96 Вт	22,1 Вт
с теплоизоляционным чехлом и устройством	3,31 Вт	4,26 Вт

Таблица 2. Показания измерений при различной температуре окружающего воздуха с использованием предложенного способа и без него,  $t_{\text{воды}} = +6$  °С

Table 2. Measurement readings at different ambient temperatures using and without the proposed method,  $t_{\text{water}} = +6$  °С

Использованное устройство рукавного разветвления	При температурах окружающего воздуха	
	–20 °С	–30 °С
без термоизоляции	+3 °С	+2 °С
с теплоизоляционным чехлом	+6 °С	+5 °С
с теплоизоляционным чехлом и подводом горячего потока воздуха	+17 °С	+15 °С

Опытные образцы были изготовлены и направлены в пожарные части г. Норильска и г. Красноярска, а также испытывались в условиях крайне низких температур на одном из этапов всероссийских учений «Безопасная Арктика 2025». В целом по результатам работы устройство показало высокую эффективность и получило положительные отзывы.

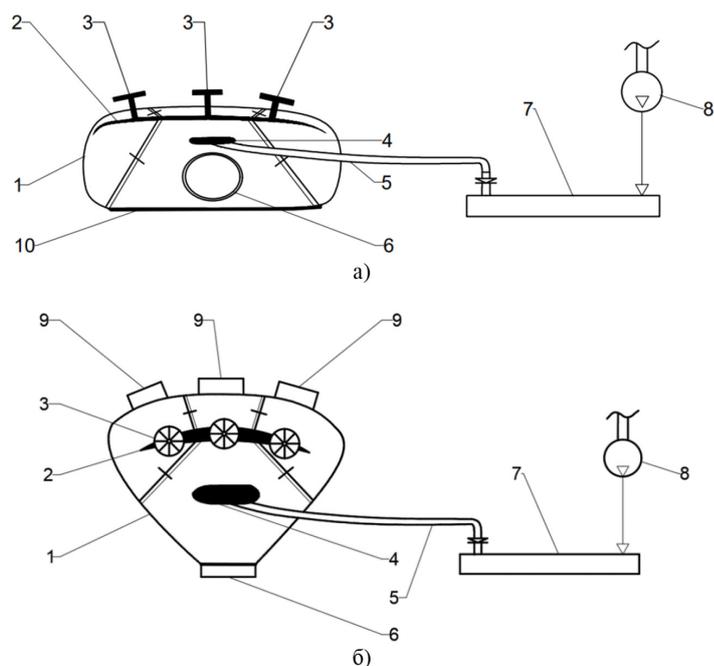


Рис. 5. Конструкция рукавного разветвления с чехлом: а) вид спереди, б) вид сверху; 1 – съемный теплоизоляционный чехол, имеющий гибкий корпус; 2 – разъем в верхней части корпуса чехла для установки разветвления; 3 – вентили разветвления; 4 – щелевое отверстие под ручку для переноски разветвления; 5 – трубка подвода нагретого воздуха внутрь чехла; 6 – трубчатый выступ задней части корпуса чехла со стороны присоединения магистрального рукава; 7 – вихревая трубка Ранка-Хилша; 8 – компрессор; 9 – трубчатые выступы на передней части корпуса чехла со стороны присоединения выкидных рукавных линий; 10 – наружный слой нижней части корпуса чехла, выполненный из непромокаемой ткани

Fig. 5. Sleeve branch design with cover: a) front view, b) top view

### Выводы

Преимущества предлагаемого способа утепления рукавного металлического разветвления, применяемого для реализации при пожаротушении, следующие:

- простота конструкции устройства, основной частью которого является съемный теплоизоляционный чехол с гибким корпусом для установки в нем разветвления;
- доступность и дешевизна исходных материалов для изготовления корпуса чехла на базовую модель разветвления;
- возможность утепления маховиков вентилях и использование надежного обогрева с помощью трубки Ранка-Хилша при низких температурах окружающей среды.

Технический результат, достигаемый использованием предложенным вариантом устройства, заключается в расширении арсенала инженерных средств, касающихся утепления рукавного разветвления, для обеспечения бесперебойной работы пожарного оборудования, за счет укомплектования теплоизоляционной конструкцией съемного чехла как основного средства утепления разветвления, обогреваемой нагретым воздухом от трубки Ранка-Хилша и позволяющей обеспечить надежное функционирование рукавного разветвления в период тушения пожара в зимний период времени.

На основании практических испытаний были получены акт внедрения от Главного управления МЧС России по Красноярскому краю и патент на изобретение, Российская Федерация № 2828940, на способ утепления рукавного разветвления в условиях низких температур, устройство для его осуществления и теплоизоляционный чехол устройства.

### Список литературы / References

[1] Куртов С.О Малый П. М., Макаров В. М. Исследование эффективности защитного кожуха для предотвращения замерзания насосно-рукавных систем в условиях отрицательных температур. Железногорск. *Научно-аналитический журнал «Сибирский пожарно-спасательный вестник»*, 2024, 4(35), 81–87 [Kurtov S.O., Small P.M., Makarov V.M. Investigation of the effectiveness of a protective casing to prevent freezing of pumping and bag systems in conditions of negative temperatures. *Zheleznogorsk Scientific and Analytical journal Siberian Fire and Rescue Bulletin*. 2024, 4(35), 81–87 (in Russian)]

[2] Енютина Т.А., Кулагина Л.В., Гафуров М.М. *Справочник. Инженерный журнал с приложением*. 2023. 11. 50–54. DOI: 10.14489/hb.2023.11. Использование вихревого эффекта в практике ликвидации чрезвычайных ситуаций 050–054. [Enyutina T.A., Kulagina L.V., Gafurov M.M. *Handbook. An engineering magazine with an appendix*. 2023. 11. 50–54. DOI: 10.14489/hb.2023.11. Using the vortex effect in emergency response practice 050–054. (in Russian)]

[3] Патент на изобретение № 2828940 Заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет». *Способ утепления рукавного разветвления в условиях низких температур, устройство для его осуществления и теплоизоляционный чехол* № 2024101780; заявл. 2024.01.25. Публ. и выдача пат. 2024.10.21.[Patent for invention No. 2828940 Applicant and patent holder Federal State Educational Institution of Higher Professional Education “Siberian Federal University”. Method of insulation of sleeve branching at low temperatures, a device for its implementation and a thermal insulation cover No. 2024101780; application No. 2024.01.25. Publ. and the issue of pat. 2024.10.21 (in Russian)]

[4] Yunpeng Xue & Maziar Arjomandi & Kelso, Richard Kelso. The working principle of a vortex tube. *International Journal of Refrigeration*. 36. 1730–1740. 10.1016/j.ijrefrig.2013.04.016.

[5] Yunpeng Xue, Maziar Arjomandi, Richard Kelso, A critical review of temperature separation in a vortex tube, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34(8), 2010, 1367–1374, ISSN 0894–1777, doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.06.010.

[6] Liew R., Zeegers J. C. H., Kuerten, J. G. M. & Michalek W. R. (2012). Maxwell’s demon in the Ranque-Hilsch vortex tube. *Physical Review Letters*, 109(5), 054503–1/4. Article 054503. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.054503.

[7] Yunpeng Xue, Maziar Arjomandi, Richard Kelso, Experimental study of the flow structure in a counter flow Ranque–Hilsch vortex tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 21–22, 2012, 5853–5860, ISSN 0017–9310, https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.05.081.

[8] Yunpeng Xue, Maziar Arjomandi, Richard Kelso, Visualization of the flow structure in a vortex tube. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 35(8), 2011, 1514–1521, ISSN 0894–1777, https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2011.07.001.

[9] Patel R. B., Bartaria V. N. Experimental Investigation & Numerical Analysis of Ranque Hilsch. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2013, 2, 1–6.

[10] Меркулов А.П. Исследование вихревых труб с криволинейной осью симметрии / А.П. Меркулов, Л.С. Кекконен // Вихревой эффект и его промышленное применение: *материалы III Всесоюз. науч.-техн. конф. / М-во высш. и сред. спец. образования РСФСР*, Куйбышев. авиац. ин-т им. С.П. Королева, Обл. правл. НТО «Машпром», Обл. орг. о-ва «Знание», Дом техники НТО; [редкол.: А.П. Меркулов и др.]. Куйбышев, КуАИ, 1981. 73–80. [Merkulov, A.P. Investigation of vortex tubes with a curved axis of symmetry / A.P. Merkulov, L.S. Kekkonen // *Vortex effect and its industrial application: Materials of the III All-Union. scientific and technical conf. / M-in higher. and Wednesdays. special. education of the RSFSR*, Kuibyshev. aviation center. S.P. Korolev Institute, Regional Board. NTO Mashprom, Regional organization of Znanie Island, NTO House of Technology; Kuibyshev, KuAI, 1981. 73–80 (in Russian)]

[11] Kiran K. Kumar Rao, Ramesh A., Rajesh M., Naga G. Malleswara Rao *Journal of Mechanical Engineering and Biomechanics*. Experimental analysis of vortex tube by varying the geometry and material a review. 2016. 1–13.

[12] Автушенко Н., Ленеvский Г. Тепловой расчет систем магистральных сетей горячего водоснабжения. *Вестник могилевского государственного технического университета* 2006. 2(11) 19–27. [Avtushenko N., Lenevsky G. Thermal calculation of the systems of the main networks of hot water supply. *Bulletin of Mogilev State Technical University* 2(11) 2006. 19–27 (in Russian)]

Theoretical and Applied Heat Engineering  
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: GDULOX

УДК 622.7

**Results of Aeromechanical Dewatering  
of Coal on a Bench-Stand Setup**

Vasily I. Murko<sup>a\*</sup>,  
Viktor I. Karpenok<sup>b</sup> and Nikita A. Lisovskiy<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Siberian State Industrial University  
Novokuznetsk, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Kuzbass State Technical University named after T. F. Gorbachev  
Novokuznetsk, Russian Federation*

Received 08.11.2025, received in revised form 10.11.2025, accepted 11.11.2025

**Abstract.** This article describes the results of research conducted on the aeromechanical dewatering of fine coals using a newly developed experimental setup. Aeromechanical dewatering is an alternative to thermal coal drying, offering increased volatile yields. The primary apparatus used for aeromechanical dewatering is a Venturi tube, in the throat of which the liquid film is stripped from the surface of coal particles, converting them into an aerosol without the water passing into the gas phase. It has been established that moisture in coals of 0–3(6) mm class can be reduced by 25 % relative to the original value. Furthermore, the energy costs for removing 1 kg of moisture do not exceed those for thermal drying (35 kW h/t).

**Keywords:** aeromechanical dewatering, experimental research, energy cost estimation, Venturi tube.

**Acknowledgements.** The study was funded by a grant from SibGIU, contract No. 116/2025 dated April 1, 2025.

Citation: Murko V.I., Karpenok V.I., Lisovskiy N.A. Results of Aeromechanical Dewatering of Coal on a Bench-Stand Setup. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(8), 1036–1040. EDN: GDULOX



© 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: murko\_vi@sibsiu.ru

## Результаты аэромеханического обезвоживания угля на стендовой установке

В. И. Мурко<sup>а</sup>, В. И. Карпенко<sup>б</sup>, Н. А. Лисовский<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Сибирский государственный индустриальный университет  
Российская Федерация, Новокузнецк

<sup>б</sup>Кузбасский государственный технический университет  
имени Т. Ф. Горбачева  
Российская Федерация, Новокузнецк

**Аннотация.** В статье описаны результаты проведенных исследований по аэромеханическому обезвоживанию мелких классов углей на созданной экспериментальной установке. Аэромеханическое обезвоживание является альтернативой термической сушки углей с повышенным выходом летучих веществ. Основным аппаратом, в котором происходит аэромеханическое обезвоживание, является труба Вентури, в горловине которой осуществляется срыв жидкой пленки с поверхности частиц угля и превращение их в аэрозоль без перехода воды в газовую фазу. Установлена возможность снижения влаги угля кл. 0–3(6) мм на 25 % отн. При этом энергетические затраты на удаление 1 кг влаги не превышают аналогичные при термической сушке (35 кВт·ч/т).

**Ключевые слова:** аэромеханическое обезвоживание, экспериментальные исследования, оценка затрат энергии, труба Вентури.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счёт гранта ФГБОУ ВО «СибГИУ», договор № 116/2025 от 01.04.2025 г.

Цитирование: Мурко В. И. Результаты аэромеханического обезвоживания угля на стендовой установке / В. И. Мурко, В. И. Карпенко, Н. А. Лисовский // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(8). С. 1036–1040. EDN: GDULOX

### Постановка проблемы

В ранее опубликованной статье [1] была описана актуальность достижения приемлемой влажности отгружаемого угля, особенно в зимнее время года. При этом достигается как повышение энергетической ценности продукта, так и снижаются риски замерзания угля в вагонах при его длительной транспортировке и хранении.

Разработанная установка аэромеханического обезвоживания с трубой Вентури была смонтирована в лаборатории Центра инновационных угольных технологий СибГИУ (рис. 1).

Характеристика экспериментальной установки:

1. Труба Вентури:

- диаметр горловины — 70 мм;
- длина горловины — 150 мм;
- диаметр диффузора (максимальный) — 250 мм;
- диаметр газопроводов — 250 мм.

2. Вентилятор центробежный 30ЦС-85:

- производительность — 3000 м<sup>3</sup>/ч;
- рабочее давление — 8000 Па;
- мощность двигателя — 15 кВт.



Рис. 1. Фото экспериментальной установки

Fig. 1. Photo of the experimental setup

В процессе пуско-наладочных работ было установлено влияние условий подачи исходного угля в конфузур трубы Вентури на эффективность обезвоживания материала. Организация оптимальной загрузки влажного материала в горловину трубы Вентури — зону с высокой локальной скоростью воздушного потока — обеспечивает интенсивное омывание вводимого материала газом и создает необходимый эффект срыва водной пленки с поверхности частиц с последующим переводом «сорванной влаги» в аэрозольное → туманное состояние [2]. Кроме того, под воздействием высоких градиентов скоростей и давления разрушаются агрегированные скопления исходного влажного угля, увеличивая общую суммарную поверхность угольных частиц. Для повышения указанного эффекта было принято решение о необходимости предварительного разрыхления исходного потока влажного угля. Данная операция осуществлялась с помощью вибростола, на днище которого дозировано подавался исходный уголь.

Целью данной работы было проведение экспериментов по аэромеханическому обезвоживанию углей различной крупности и зольности на созданной установке с определением энергетических затрат на удаление влаги.

### Методы и результаты

Для оценки режима течения воздушного потока в горловине трубы Вентури были выполнены замеры скорости воздушного потока на выходе из газохода после вентилятора с применением чашечного анемометра МС-13. В результате было установлено, что общая производительность воздушного потока составила около  $2000 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Таким образом, скорость потока в горловине трубы Вентури равнялась  $145 \text{ м/с}$ , что соответствовало предварительно выполнен-

ным расчетам. С учетом длины горловины, равной 0,15 м, длительность нахождения угольных частиц в горловине составляла около 0,001 с. В течение указанного времени жидкие пленки частиц срываются с поверхности и в виде аэрозоля вместе с «высушенными» частицами через диффузор трубы поступают в осадительную камеру.

В работе [1] было показано, что градиент скорости воздушного потока и влажных частиц, вовлекаемых в движение в горловине трубы Вентури, существенно зависит от диаметра частиц. Таким образом, эффективность аэромеханического обезвоживания мелких частиц значительно ниже крупных.

В процессе исследований определяли:

- гранулометрический состав частиц угля с помощью ситового метода по ГОСТ 2093–82;
- влажность угля с применением анализатора влажности МА-30;
- зольность угля с использованием муфеля и аналитических весов по ГОСТ Р 55661–2013.

В табл. 1 представлена характеристика проб исходного и обезвоженного угля.

Таблица 1. Характеристика проб угля

Table 1. Characteristics of coal samples

Характеристика, единица измерения	Проба 1		Проба 2	
	исходная	после обезвоживания	исходная	после обезвоживания
Гранулометрический состав, %				
+3 мм	35,7	41,1	-	-
1–3 мм	40,3	46,2	5,6	7,7
0,5–1,0 мм	9,2	5,8	39,2	45,0
0,25–0,5 мм	5,7	2,9	20,4	19,3
0,16–0,25 мм	3,3	1,8	15,0	10,0
0,071–0,16 мм	2,4	1,9	9,7	8,1
-0,071 мм	3,4	0,3	10,1	9,9
Зольность, %	16,0	16,0	8,2	8,2
Влажность, %	12,1	9,1	9,6	7,2
Разность влажности исходного и обезвоженного продукта, % <sub>абс</sub> / % <sub>отн</sub>	3,0 / 25,0		2,4 / 25,0	

Как видно из табл. 1, в результате аэромеханического обезвоживания происходит частичный унос мелких классов (содержание кл. –0,071 мм в первой пробе снизилось с 3,4 до 0,3 %, а во второй пробе — с 10,1 до 9,9 %) за счет малой эффективности их обезвоживания и уноса. Это подтверждает закономерность, которая была установлена аналитически в работе [1], согласно которой нижним пределом для аэромеханического обезвоживания являются частицы размером 40–50 мкм. Установлено, что для крупнозернистой пробы достигнутое снижение влажности в абсолютных процентах (3,0) больше, чем для мелкозернистой пробы угля. При этом достигнутая конечная влажность для обеих проб отличается незначительно (менее 2 %).

Таблица 2. Изменение конечной влажности угля в зависимости от исходной

Table 2. Change in the final moisture content of coal depending on the initial

Наименование параметра	Номер пробы		
	№ 1	№ 2	№ 3
Влажность исходной пробы, $W_1$ , %	13,6	15,6	18,1
Влажность пробы после обезвоживания, $W_2$ , %	9,5	9,6	9,8

В табл. 2 представлена зависимость конечной влажности при аэромеханическом обезвоживании от исходной.

Как видно из табл. 2, влажность обезвоженного материала близка к 10 %, что является для данного угля близким значением к пределу механического обезвоживания. При этом изменение начальной влажности в широких пределах (от 13 до 18 %) дает близкие значения конечной влажности при аэромеханическом обезвоживании.

Расчеты показали, что при аэромеханическом обезвоживании с производительностью 400 кг/ч (по исходному углю), влажности от 18 до 10 % затраты энергии составляют 15 кВт·ч (54МДж), при этом количество удаленной влаги составляет 20 кг. При термической сушке 400 кг/ч с учетом нагрева угля до 60 °С и испарения 20 кг воды затраты энергии составят 79,5 МДж, что почти в 1,5 раза больше, чем при аэромеханическом способе.

### Заключение

Разработана и создана экспериментальная установка по аэромеханическому обезвоживанию угля. Аналитически установлено и экспериментально подтверждено, что процесс аэромеханического обезвоживания эффективен для углей кл. 0–3(6) мм с малым количеством микронных частиц (50–60 мкм).

Установлено, что возможно достичь снижения влажности мелкого угля не менее чем на 25 % отн., при этом конечная влажность обезвоженного материала практически не зависит от исходной его влажности.

Энергетические затраты на срыв и превращение в аэрозоль поверхностной влаги угольных частиц более чем на 30 % меньше аналогичных затрат при взрыво- и пожароопасной термической сушке.

### Список литературы / References

[1] Лисовский Н. А., Мурко В. И., Карпенко В. И., Матюшенко А. И. Исследование процесса срыва воды с угольных частиц аэромеханическим методом, *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2025, 18(6), 747–754 [Lisovsky N. A., Murko V. I., Karpenok V. I., Matyushenko A. I. Study of the process of water separation from coal particles by the aeromechanical method, *Journal of SFU. Engineering and Technology*, 2025, 18(6), 747–754 (in Russian)]

[2] Филиппов В. А. *Технология сушки и термоаэроклассификации углей*. М.: Недра, 1987. 287. [Filippov V. A. *Technology of Coal Drying and Thermo-Aero-Classification*. М., Nedra, 1987. 287. (in Russian)]

EDN: CVJEWJ

УДК 621.791.927.2

## **Production of Laminated Composite Based on High-Speed Steel by Induction Surfacing**

**Stepan A. Klimov\***, **Fedor M. Noskov**,  
**Aleksandr M. Tokmin** and **Oleg A. Masansky**  
*Siberian Federal University*  
*Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 04.06.2025, received in revised form 25.10.2025, accepted 10.11.2025

**Abstract.** The paper is devoted to the study of the possibility of obtaining deposited layers based on powder high-speed steel 10R 6M5 by induction deposition. Compositions of the deposited mixture satisfying the technology are selected and flux composition based on molten borax with boric acid and a number of oxides is proposed. Technology has been developed, deposited layers based on high-speed steel have been obtained and studied. It is shown that the structure of the deposited layers is austenite cells with martensite inclusions, as well as ledeburite eutectic along the perimeter of the cells. According to X-ray phase analysis, a number of carbides such as M<sub>12</sub>C, M<sub>6</sub>S, M<sub>2</sub>S and MS are observed in the surfacing composition, which are characteristic of high-speed steels obtained by various methods (casting, plasma surfacing, sintering, etc.). It is shown that hardness of high-speed steel deposits varies 10R 6M5 from 61 to 65 HRC, depending on technological conditions of deposit.

**Keywords:** induction surfacing, structure, high-speed steel, special carbides.

Citation: Klimov S. A., Noskov F. M., Tokmin A. M., Masansky O. A. Production of Laminated Composite Based on High-Speed Steel by Induction Surfacing. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(8), 1041–1048. EDN: CVJEWJ



## Получение слоистого композита на основе быстрорежущей стали методом индукционной наплавки

С. А. Климов, Ф. М. Носков,  
А. М. Токмин, О. А. Масанский  
*Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск*

**Аннотация.** Работа посвящена исследованию возможности получения наплавленных слоев на основе порошковой быстрорежущей стали 10P6M5 методом индукционной наплавки. Подобраны удовлетворяющие технологии состава наплавляемой шихты и предложен состав флюса на основе плавленной буры с добавками борной кислоты и ряда оксидов. Разработана технология, получены и исследованы наплавленные слои на основе быстрорежущей стали. Показано, что структура наплавленных слоев представляет собой ячейки аустенита с включениями мартенсита, а также ледебуритной эвтектикой по периметру ячеек. По данным рентгенофазового анализа в составе наплавки наблюдается ряд карбидов типа  $M_{12}C$ ,  $M_6C$ ,  $M_2C$  и  $MC$ , свойственных быстрорежущим сталям, полученным различными методами (литьем, плазменной наплавкой, спеканием и др.). Показано, что твердость наплавки быстрорежущей стали 10P6M5 варьируется от 61 до 65 HRC, в зависимости от технологических режимов наплавки.

**Ключевые слова:** индукционная наплавка, структура, быстрорежущая сталь, специальные карбиды.

Цитирование: Климов С. А. Получение слоистого композита на основе быстрорежущей стали методом индукционной наплавки / С. А. Климов, Ф. М. Носков, А. М. Токмин, О. А. Масанский // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(8). С. 1041–1048. EDN: CVJEWJ

### Введение

Структурно-фазовое состояние быстрорежущих сталей, полученных в различных условиях, является предметом исследований на протяжении многих лет и продолжает оставаться актуальными [1–4]. Это связано с определяющим влиянием структуры стали на ее механические и эксплуатационные свойства.

Существует технология индукционной наплавки металлических слоев [5–9]. Процесс наплавки базируется на использовании нагрева токами высокой частоты. В результате многофакторного воздействия электромагнитного поля на металлическую подложку и исходную шихту синтезируется многослойный композит, у которого на поверхности может быть сформирован слой, обладающий комплексом свойств: износостойкостью, кислотоупорностью, жаростойкостью и т.д. Методика нанесения слоев характеризуется относительной дешевизной оборудования, простотой осуществления и скоротечностью процесса наплавки, частично совмещающейся, при необходимости, с термической обработкой наплавленного слоя. Благодаря концентрированному нагреву наплавляемого слоя при индукционном нагреве минимизируется возможность перемешивания наплавляемого слоя и подложки, что обеспечивает более однородный состав быстрорежущей стали по всему объему наплавки.

Таким образом, *цель работы*: исследовать структурно-фазовое состояние слоев, наплавленных методом индукционной наплавки, из порошковой быстрорежущей стали 10P6M5.

*Задачи работы*:

1. Предложить состав флюса для индукционной наплавки порошковой стали 10P6M5.
2. Получить наплавленные слои быстрорежущей стали.
3. Исследовать структурно-фазовое состояние и свойства полученных образцов.

### Материал и методы исследования

В качестве основного компонента шихты для получения наплавленных слоев выступала порошковая быстрорежущая сталь 10P6M5. Важную роль при индукционной наплавке играет флюс, защищающий наплавляемый металл и поверхность стальной подложки от окисления кислородом воздуха [5]. В качестве флюса использовалась смесь порошковой плавленой буры, борной кислоты и добавок оксидов кремния, магния, кальция и натрия.

При подборе флюса учитывался фактор влияния магнитного поля, возникающего в зоне наплавки на шихту. Одной из проблем получения методом индукционной наплавки слоев на основе быстрорежущей стали является ферромагнетизм порошковой стали, которая на начальном этапе нагрева (до перехода в парамагнитное состояние) активно взаимодействует с магнитным полем, создаваемым индукционной установкой в зоне наплавки. Для предотвращения перемещения порошковой шихты ее прессовали в брикеты. Кроме того, существенную роль играет флюс, выступая в определенном температурном диапазоне своеобразным «связующим» между частицами шихты – в тот момент, когда флюс уже расплавился, а нагретая металлическая часть шихты еще нет.

Для прессовки брикетов наиболее эффективно показала себя поршневая система. Смешанные компоненты шихты укладывались в контейнер, предварительно смоченный пластификатором на основе органического соединения. Он уменьшает фактор прилипания компонентов к стенкам контейнера и поршню. С помощью поршня происходило уплотнение образца. В процессе прессования могли выделяться излишки связующего и пластификатора. После уплотнения брикет просушивался в течение минимум 2 часов при температуре 80 °С.

В качестве подложек для наплавки служили пластины углеродистой конструкционной стали 45.

Наплавка пластин (рис. 1) осуществлялась при помощи высокочастотной индукционной установки типа УВГ 2–25, с генератором ГНОМ-25М1 с мощностью до 20 кВт и рабочей частотой генератора от 44 до 66 кГц. Использовался витковый индуктор с ферритным водоохлаждаемым сердечником. Для фиксации брикетов на первом этапе наплавки и предотвращения повреждения индуктора на наплавляемые брикеты укладывалась асбестовая прокладка (рис. 1).

Охлаждение после завершения наплавки осуществлялось в двух режимах: на воздухе и в воде.

Исследования микроструктуры образцов осуществляли на оптическом микроскопе CarlZeiss Axio Observer.D 1 и электронном микроскопе Hitachi TM4000 с микроанализатором. Фазовый состав сплава определяли рентгеноструктурным методом на дифрактометре «Bruker» с использованием излучения меди. Твердость наплавленных слоев измеряли методом Роквелла.

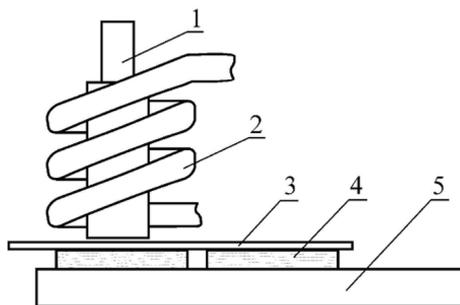


Рис. 1. Схема индукционной наплавки: 1 – ферритный сердечник; 2 – витковый индуктор; 3 – асбестовая прокладка; 4 – наплавляемый брикет; 5 – металлическая подложка в форме пластины

Fig. 1. Induction surfacing scheme: 1 – ferrite core; 2 – coil inductor; 3 – asbestos gasket; 4 – welded briquette; 5 – metal substrate in the form of a plate

### Результаты исследований

При индукционной наплавке быстрорежущей порошковой стали 10P6M5 наблюдается характерная для этой стали ячеистая структура с расположенными между ячейками включениями ледебуритной эвтектики (рис. 2). На рис. 2а слева представлена микроструктура наплавленного слоя, справа – подложка.

Во всех образцах обнаружена ледебуритная эвтектика с различной морфологией, как веерообразной, характерной для стали 10P6M5 (рис. 2а), так и иной (рис. 2б). В ячейках аустенита после травления спиртовым раствором азотной кислоты отчетливо наблюдаются мартенситные кристаллы (рис. 2б).

На рис. 3 показаны результаты рентгенофазового исследования образца быстрорежущей стали 10P6M5, полученного индукционной наплавкой.

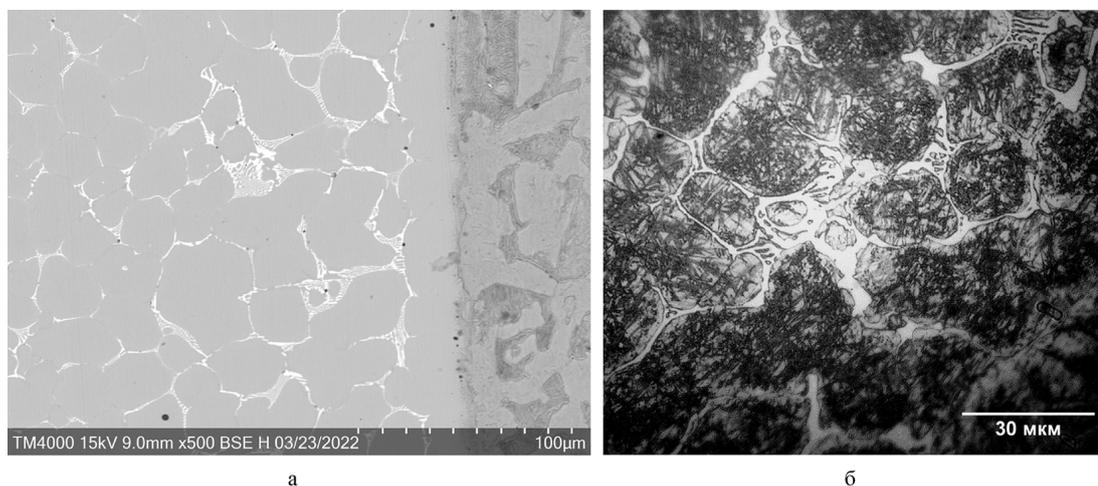


Рис. 2. Микроструктура наплавленных слоев быстрорежущей стали 10P6M5, полученных: а – на сканирующем электронном микроскопе; б – на оптическом микроскопе

Fig. 2. The microstructure of the deposited layers of high-speed steel 10R 6M5 obtained: a – on a scanning electron microscope; b – on an optical microscope

Наблюдается набор значительного количества фаз, включающих в себя и твердые растворы, и мартенсит, и карбидные фазы (как специальных карбидов, так и цементита). По данным рентгенофазового исследования в структуре наблюдаются феррит, аустенит, мартенсит, цементит и ледебурит с карбидами типа  $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ ,  $\text{Fe}_6\text{W}_6\text{C}$ . Кроме этого, присутствуют наравне с карбидом ванадия VC карбидные включения типа WC.

Микрорентгеноспектральный анализ показал, что карбидная фаза по составу делится на ванадиевую (типа MC) и вольфрамо-молибденовую (скелетные карбиды). Любопытным является то, что исследование твердых растворов показало наличие аустенита с достаточно резко отличающимися составами (рис. 4).

Присутствует твердый раствор на основе аустенита, состав которого может варьироваться в широких пределах: твердые растворы, обогащенные вольфрамом и молибденом, и твердые растворы, обогащенные хромом и ванадием (наравне с другими легирующими элементами, см. рис. 4в, г).

Показатели твердости наплавленного слоя для образцов, охлажденных на воздухе и в воде, несколько отличались. Так, образцы, охлажденные на воздухе, демонстрировали более равномерное распределение твердости – она на различных участках образца варьировалась от 62 до 63 единиц по Роквеллу. Образцы же, охлажденные в воде, показывали больший разброс значений твердости на различных участках – от 61 до 65 HRC. Эта особенность может быть связана с характером и количеством возникшего при охлаждении с температуры наплавки мартенсита и, возможно, большей равномерностью выделяющихся дисперсных карбидов при медленном охлаждении.

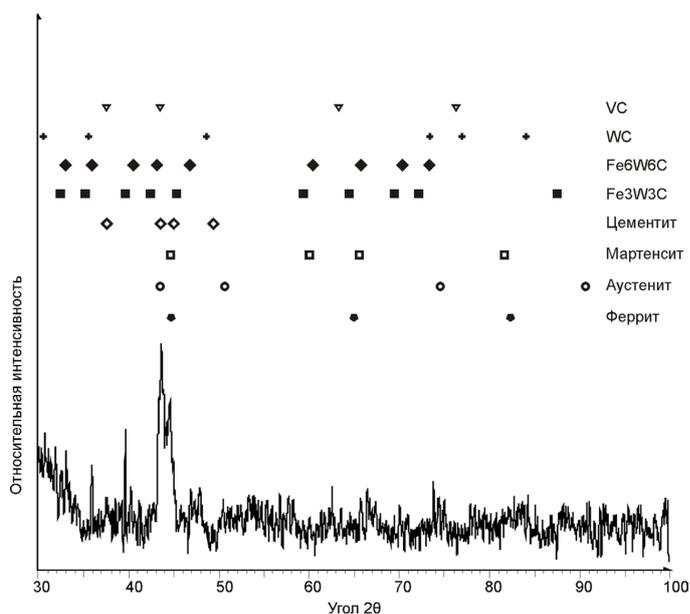


Рис. 3. Дифрактограмма образца быстрорежущей стали 10Р6М5, полученного индукционной наплавкой

Fig. 3. Diffractogram of a sample of high-speed steel 10R6M5 obtained by induction surfacing

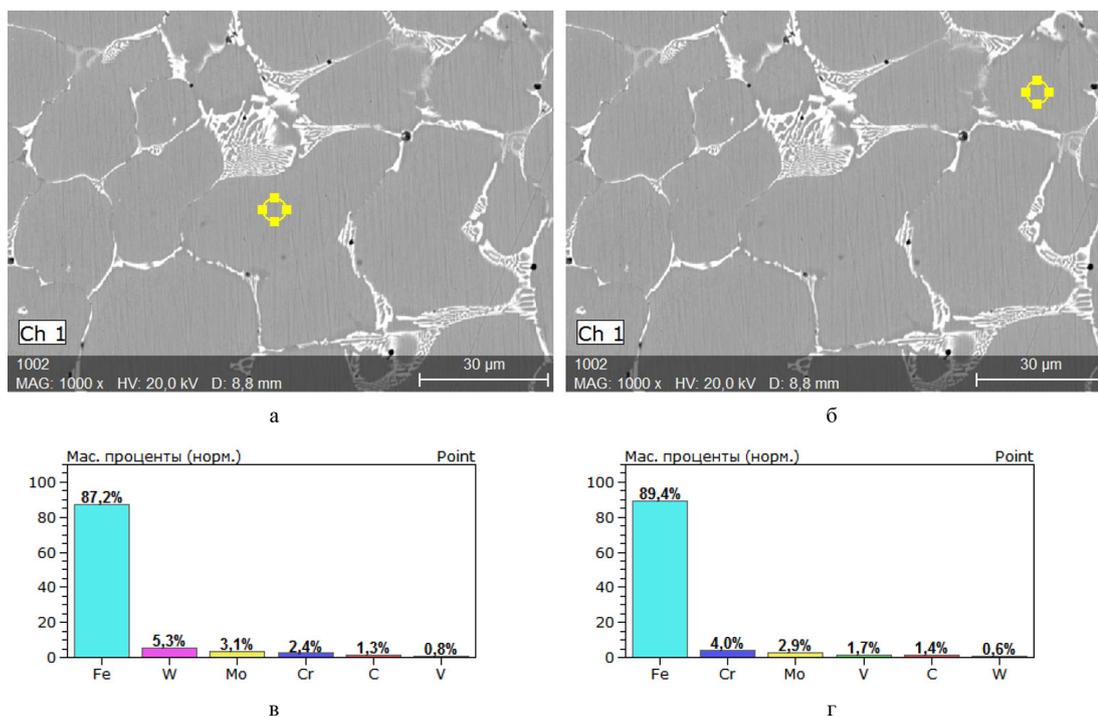


Рис. 4. Микрорентгеноспектральное исследование образца быстрорежущей стали 10Р6М5: *a*, *б* – точки снятия спектров; *в*, *г* – соответствующие спектры

Fig. 4. Microrentgenospectral study of a sample of high-speed steel 10R 6M5: *a*, *b* – sampling points; *c*, *d* – corresponding spectra

### Обсуждение результатов

Исследование микроструктуры полученных наплавленных слоев показало, что в целом структура соответствует характерным особенностям структуры литой быстрорежущей стали Р6М5. Кристаллизация этой стали представляет собой сложный, многофакторный процесс, который включает в себя перитектическое, эвтектическое и эвтектоидное превращения. Традиционно принято считать [10], что для небольших отливок кристаллизация начинается с выпадения  $\delta$ -феррита, который при остывании сплава вступает в перитектическую реакцию с жидкостью, формируя аустенитные зерна. При завершении перитектического превращения структура характеризуется аустенитными зёрнами, распределенными в жидкой стали.

При последующем остывании из жидкости выделяется первичный карбид  $M_6C$ , а при дальнейшем охлаждении оставшаяся жидкость претерпевает эвтектическое превращение, формируя аустенитно-карбидную смесь. Основным карбидом является карбид  $M_6C$  с небольшим количеством MC [10].

По достижении температуры эвтектоидного превращения аустенит распадается на эвтектоид, формируя дисперсную смесь феррита и карбидов (среди них основным является  $M_6C$ , но также возможно появление карбидов цементитного типа  $M_3C$  и, по-видимому, других карбидов).

Современный подход к описанию процесса кристаллизации стали типа Р6М5, выполненного с помощью компьютерного моделирования в программном пакете Thermo-Calc (база дан-

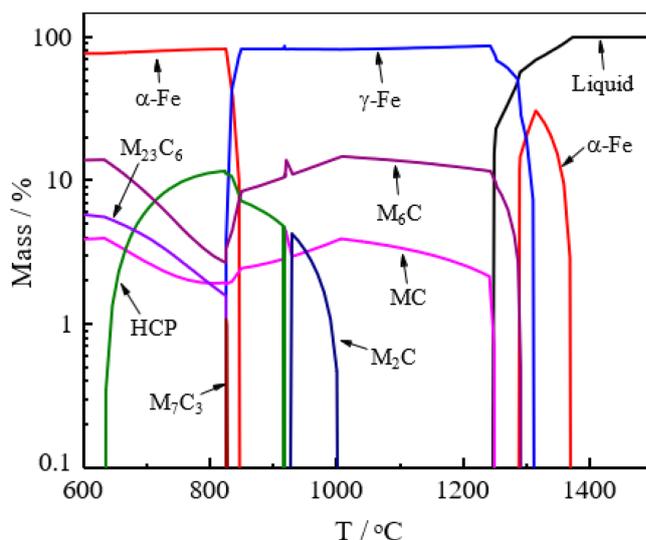


Рис. 5. Последовательность фазовых превращений при затвердевании жидкой стали типа Р6М5, рассчитанная в программном пакете Thermo-Calc [3]

Fig. 5. The sequence of phase transformations during solidification of liquid steel of type R 6M5, calculated in the Thermo-Calc software package [3]

ных TCFE 7), показал (рис. 5), что пять различных типов карбидов, то есть  $M_6C$ ,  $MC$ ,  $M_2C$ ,  $M_7C_3$  и  $M_{23}C_6$ , осаждаются последовательно при понижении температуры в быстрорежущей стали в условиях равновесного затвердевания и охлаждения [3].

Различие в составе твердых растворов, формирующихся при охлаждении, обусловлено неравномерностью процесса кристаллизации отдельных участков жидкости – вблизи твердых кристаллов (самой тугоплавкой фазы карбида ванадия и, возможно, других фаз) и в отдалении от нее. Вероятно, в процессе наплавки и некоторые порошинки быстрорежущей стали не расплавляются полностью, а только оплавляются, сохраняя в сердцевине участки с исходной твердой структурой, они служат естественными центрами кристаллизации при охлаждении и дают свой вклад в неравномерность химического состава формируемого аустенита.

Ускоренное охлаждение с температур наплавки накладывает свой отпечаток на структурно-фазовые превращения, в частности, приводят к частичной закалке и более интенсивному формированию мартенсита в аустенитных кристаллах. Кроме того, охлаждение в воде способствует более дисперсному распределению эвтектических карбидов и, по-видимому, частично подавляет выпадение дисперсных выделений карбидов в низкотемпературном интервале (см. рис. 5).

### Выводы

Разработана удовлетворяющая индукционной наплавке технология получения слоистых композитов на основе быстрорежущей стали 10P6M5 на стальных подложках из стали 45. Разработан состав флюса для наплавки, включающий буру и борную кислоту в качестве основы с добавками оксида кремния, магния, кальция и натрия. Микроструктура полученных образцов характеризуется наличием аустенита, мартенсита, цементита и ряда специальных карби-

дов типа  $M_6C$ ,  $M_2C$ ,  $MC$  и др. Твердость наплавленного слоя варьируется от 61 до 65 HRC в зависимости от условий получения слоя.

Таким образом, показана возможность получения наплавов порошковой быстрорежущей стали 10P6M5 методом индукционной наплавки.

### Список литературы / References

[1] Wang Y., Mao B., Chu S., Chen S., Xing H., Zhao H., Wang S., Wang Y., Zhang J., Sun B. Advanced manufacturing of high-speed steels: A critical review of the process design, microstructural evolution, and engineering performance. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023, 24, 8198–8240. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.269>

[2] Chen Y., Ye C., Chen X., Zhai Q., Hu H. Effect of Alloying and Microalloying Elements on Carbides of High-Speed Steel: An Overview. *Metals*. 2024, 14, 175. <https://doi.org/10.3390/met14020175>  
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123554>

[3] Liu Y., Li J., Liang W., Gao J., Qi Y., Shang C. Precipitation Behaviors of Carbides in High Speed Steel during ESR and Heat Treatment. *Metals*. 2021, 11, 1781. <https://doi.org/10.3390/met11111781>

[4] Pan Yu, Pi Z., Liu B., Xu W., Zhang C., Qu X., Lu X. Influence of heat treatment on the microstructural evolution and mechanical properties of W6Mo5Cr4V2Co5Nb (825 K) high speed steel. *Materials Science and Engineering*. 2020, 787, 139480. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139480>

[5] Ткачев В.Н., Фиштейн Б.М., Казинцев Н.В., Алдырев Д.А. Индукционная наплавка твердых сплавов. Москва: *Машиностроение*. 1970. 184 с. [Tkachev V.N., Fishtein B.M., Kazintsev N.V., Aldyrev D.A. Induction surfacing of solid alloys. Moscow: *Mechanical Engineering*, 1970:184 p. (in Russian)]

[6] Rudnev V.I., & Loveless D. Induction Hardening. *Comprehensive Materials Processing*. 2014, 489–580. doi:10.1016/b978-0-08-096532-1.01217-6.

[7] Маликов В.Н., Ишков А.В., Войнаш С.А. Исследование процессов упрочнения стальных деталей методом индукционной наплавки. *Металлург*. 2021, 11, 69–75. [Malikov V.N., Ishkov A.V., Voinash S.A. Study of the processes of strengthening steel parts by induction surfacing. *Metallurgist*. 2021, 11, 69–75 (in Russian)]

[8] Боль А.А., Иванайский В.В., Лесков С.П., Тимошенко В.П. Индукционная наплавка, технология, материалы, оборудование. Барнаул: *Патент RU 1664488*. Заявка на изобретение No. 4671521, 1991, 148. [*Induction surfacing, technology, materials, equipment*. Barnaul. *Patent RU 1664488*. Application for invention No. a 4671521, 1991, 148 (in Russian)]

[9] Mishra A., Bag S., Pal S. Induction heating in sustainable technologies of production and processing of materials – A review of modern literature. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. 2020; 343–357. DOI: 10.1016/B 978-0-12-803581-8.11559-0

[10] Геллер Ю.А. Инструментальные стали. 4-е изд., перераб. и доп. М., *Металлургия*. 1975. 584. [Yu. A. Geller. Instrumental steels. 4th ed., Revised and add. M., *Metallurgy*. 1975. 584 (in Russian)]

EDN: BGRTMK

УДК 678

## **Influence of Carbon Black Content in Rubber Compound on the Properties of Nitrile Rubber**

**Afanasiy A. Dyakonov<sup>a, b\*</sup>,**  
**Andrey P. Vasilyev<sup>a</sup>, Pavel V. Vinokurov<sup>a</sup>,**  
**Aytalina A. Okhlopkova<sup>a</sup> and Evgeniy G. Parenko<sup>c</sup>**

*<sup>a</sup> North-Eastern Federal University  
Yakutsk, Russian Federation*

*<sup>b</sup> Institute of Physical and Technical Problems  
of the North SB RAS*

*Yakutsk, Russian Federation*

*<sup>c</sup> Vodokanal JSC*

*Yakutsk, Russian Federation*

Received 21.05.2025, received in revised form 25.10.2025, accepted 12.11.2025

**Abstract.** The article presents the results of a comprehensive study of the effect of medium-active carbon black N 550 on the properties of nitrile elastomer. It has been established that the optimal physical and mechanical characteristics are achieved with a content of 60–80 phr of carbon black: the maximum relative elongation is observed at 60 phr, while the best wear resistance and strength indicators are at 80 phr. Exceeding this concentration leads to deterioration of properties due to oversaturation of the system. The temperature and performance characteristics of the materials are studied. It is shown that thermal aging causes a decrease in elasticity and an increase in strength, and these effects weaken with an increase in the carbon black content. Water saturation for 30 days leads to an insignificant decrease in hardness without changing the strength characteristics. The glass transition temperature does not depend on the carbon black content, but the segmental mobility of the matrix shifts to higher temperatures with an increase in the filler concentration. Particular attention is paid to the surface morphology and tribological characteristics. It was found that with a content of 80 phr of carbon black, the structure of the material has the smoothest surface, and samples with 60–80 phr demonstrate a specific wear pattern. The practical significance of the work is confirmed by the successful implementation of the developed formulation for sealing rings of the FIP M9.02.01 flow meter at the enterprise Vodokanal of Yakutsk. Operation of the products for more than 2 years confirmed their reliability and efficiency, and the seals continue to work.

© 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: afonya71185@mail.ru

**Keywords:** carbon black, nitrile rubber, glass transition temperature, frost resistance, elastic strength properties.

**Acknowledgements.** The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education, State Project No. FSRG-2023–0026.

Citation: Dyakonov A. A., Vasilyev A. P., Vinokurov P. V., Okhlopkova A. A., Parenko E. G. Influence of Carbon Black Content in Rubber Compound on the Properties of Nitrile Rubber. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(8), 1049–1061. EDN: BGRTMK



## Влияние содержания технического углерода на свойства бутадиен-нитрильного эластомера

А. А. Дьяконов<sup>а, б</sup>, А. П. Васильев<sup>а</sup>,  
П. В. Винокуров<sup>а</sup>, А. А. Охлопкова<sup>а</sup>, Е. Г. Паренко<sup>в</sup>

<sup>а</sup>Северо-Восточный федеральный университет

Российская Федерация, Якутск

<sup>б</sup>Институт физико-технических проблем Севера СО РАН

Российская Федерация, Якутск

<sup>в</sup>АО «Водоканал»

Российская Федерация, Якутск

**Аннотация.** В статье представлены результаты комплексного исследования влияния содержания среднеактивного технического углерода (ТУ) N 550 на свойства бутадиен-нитрильных эластомеров. Установлено, что оптимальные упруго-прочностные характеристики достигаются при содержании 60–80 масс.ч. ТУ: максимальное относительное удлинение наблюдается при 60 масс.ч., тогда как наилучшие показатели износостойкости и прочности при 80 масс.ч. Превышение данной концентрации приводит к ухудшению свойств вследствие перенасыщения системы. Показано, что термическое старение вызывает снижение эластичности и увеличение прочности, причем эти эффекты ослабевают с ростом содержания ТУ. Водонасыщение в течение 30 суток приводит к незначительному снижению твердости без изменения прочностных характеристик. Температура стеклования не зависит от содержания ТУ, однако начало сегментальной подвижности матрицы смещается в область более высоких температур с увеличением концентрации наполнителя. Исследована морфология поверхности низкотемпературных сколов и поверхности после испытания на износостойкость. Установлено, что при содержании 80 масс.ч. ТУ структура материала имеет наиболее гладкую поверхность, а образцы с 60–80 масс.ч. демонстрируют специфический характер износа. Практическая значимость работы подтверждена успешным внедрением разработанной рецептуры в качестве уплотнительных колец расходомера FIP M9.02.01 на предприятии АО «Водоканал» г. Якутска. Эксплуатация изделий в течение более двух лет подтвердила их надежность и эффективность, уплотнители продолжают работать.

**Ключевые слова:** технический углерод, бутадиен-нитрильный эластомер, температура стеклования, морозостойкость, упруго-прочностные свойства.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке МНиВО ГЗ № FSRG-2023–0026.

Цитирование: Дьяконов А. А. Влияние содержания технического углерода на свойства бутадиен-нитрильного эластомера / А. А. Дьяконов, А. П. Васильев, П. В. Винокуров, А. А. Охлопкова, Е. Г. Паренко // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(8). С. 1049–1061. EDN: BGRTMK

## Введение

Технический углерод (ТУ) широко применяется в химической промышленности и материаловедении благодаря своей способности модифицировать эксплуатационные свойства материалов. Не является исключением и применение ТУ в промышленном производстве эластомерных изделий [1], в частности, таких как шины, конвейерные ленты, уплотнители, сальники, амортизаторы, шланги и т.д. Введение ТУ в эластомерную матрицу на стадии смешения ингредиентов резиновой смеси позволяет существенно улучшить свойства конечного изделия – увеличить прочность на разрыв, стойкость к абразивному истиранию, сопротивление старению, термостойкость и существенно снизить стоимость композиций за счет частичной замены дорогостоящих каучуков. ТУ проявляет высокую активность в отношении макромолекул каучука, которая определяется основными его характеристиками – размерами частиц, структурой, адсорбционной активностью и удельной адсорбционной поверхностью [2].

В исследовании [3] изучено воздействие механоактивации на характеристики ТУ и его влияние на свойства резиновых композитов. Механическая активация ТУ приводит к модификации его поверхностных свойств, что, в свою очередь, улучшает эластичность резиновых смесей при сохранении их прочностных характеристик. Результаты исследования по активации ТУ методом окисления Лапрамом 294 демонстрируют значительный потенциал данного способа модификации для улучшения эксплуатационных характеристик шинных резиновых смесей [4]. Как установлено в исследовании [5], контролируемое окисление печного ТУ пероксидом водорода с точной регуляцией pH среды и концентрации окислителя открывает новые возможности для расширения ассортимента модифицированных углеродных материалов за счет варьирования поверхностных функциональных групп при сохранении исходной морфологии и структуры частиц. В исследовании [6] показано, что введение ТУ с различной активностью в резиновые смеси существенно влияет на физико-механические и температурные характеристики. В связи с этим при разработке рецептур для конкретных резинотехнических изделий критически важно экспериментально подбирать наполнитель, обеспечивающий требуемые эксплуатационные свойства.

Актуальность исследования влияния ТУ на свойства эластомерных материалов подтверждается значительным количеством научных работ, посвященных данной проблематике. Однако, несмотря на обширную исследовательскую базу, остается ряд недостаточно изученных аспектов, в частности: зависимость свойств эластомеров от содержания ТУ, пороговые значения наполнения для различных типов каучуков, нелинейные эффекты при высоких степенях наполнения.

Цель работы – изучение влияния концентрации среднеактивного технического углерода марки N 550 на свойства эластомера на основе бутадиен-нитрильного каучука БНКС-40. На основании полученных результатов проведены натурные испытания уплотнительных колец расходомера, изготовленных из разработанной резиновой смеси, в реальных условиях эксплуатации на объектах АО «Водоканал» (г. Якутск).

## Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлись эластомеры на основе бутадиен-нитрильного каучука в зависимости от количества содержания среднеактивного ТУ. Для изготовления резиновой смеси использовали бутадиен-нитрильный каучук марки БНКС-40 (Сибур, Россия) с содержанием нитрила акриловой кислоты 36–40 %, печной ТУ марки N 550 с удельной поверхностью

Таблица 1. Рецепттура резиновых смесей на основе каучука БНКС-40

Table 1. Formulation of rubber mixtures based on NBR rubber

№	Ингредиенты	Масс.ч.							Время (мин)
		1	2	3	4	5	6	7	
1	БНКС-40	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0
2	Стеариновая кислота	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	0
3	Технический углерод N 550	<b>60,0</b>	<b>70,0</b>	<b>80,0</b>	<b>90,0</b>	<b>100,0</b>	<b>110,0</b>	<b>120,0</b>	2
4	Оксид цинка	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	5
5	Ацетонанил	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	7
6	Инден-кумароновая смола	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	7
7	2-Меркаптобензотиазол	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	10
8	Дифенилгуанидин	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	10
9	Сера	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	14
	Общее время								20

40 м<sup>2</sup>/г (Ивановский техуглерод и резина, Россия). Рецепттуры резиновых смесей и время введения ингредиентов в смеситель приведены в табл. 1.

Смешение ингредиентов резиновой смеси проводили в лабораторном резиносмесителе закрытого типа Plastograph EC Plus (Brabender, Германия) в течение 20 мин при скорости вращения валков 25 об/мин и начальной температуре 40 °С. Вулканизацию резиновых смесей осуществляли методом горячего прессования в термогидравлическом прессе ПКМВ-100 (Импурс, Россия) при температуре 155 °С в течение 20 мин под давлением 10 МПа.

Исследовали физико-механические свойства исходных эластомерных образцов после термического старения и выдержки в водопроводной воде при комнатной температуре в течение 720 ч. Упруго-прочностные свойства определяли на испытательной машине Autograph AGS-J (Shimadzu, Япония) при комнатной температуре в соответствии с ISO 37–2020 при перемещении захватов со скоростью 500 мм/мин. Определение твердости по Шору А проводили при комнатной температуре в ненапряженном состоянии по стандарту ISO 7619–1–2009. Износостойкость эластомеров определяли по объемному истиранию об абразивную поверхность наждачного полотна зернистостью N 150 на машине трения МИ-2 (Метротекс, Россия) согласно стандарту ISO 4649–85. Остаточное деформационное сжатие (ОДС) на 20 % и стойкость к термическому старению вулканизатов определяли согласно стандарту ГОСТ 9.029–74 при выдержке в сушильном шкафу в течение 72 ч при температуре 100 °С. Степень набухания эластомеров в среде гидравлического масла АМГ-10 определяли при комнатной температуре после выдержки 72 ч согласно стандарту ГОСТ 9.030–74.

Исследование микроструктуры эластомерных образцов проводили методом электронной микроскопии на JSM-7800F (JEOL, Япония) в режиме вторичных электронов. Хрупкие сколы получали в среде жидкого азота, что обеспечивает сохранение морфологии без эластических деформаций. Для исследования температурного поведения эластомеров определяли температуру стеклования методом дифференциальной сканирующей калориметрии на приборе DSC 204 F1 Phoenix (Netzsch, Германия). Исследование начала сегментальной подвижности

макромолекул в эластомерах проводили методом термомеханического анализа на приборе ТМА-60 (Shimadzu, Япония) в режиме нагрева со скоростью 10 °С/мин при статическом усилии индентора 50 Н.

### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты, представленные в табл. 2, демонстрируют выраженную зависимость физико-механических показателей эластомерных композиций от содержания ТУ. Наибольшее значение удлинения эластомера наблюдается при содержании 60 масс.ч. ТУ. Дальнейшее увеличение приводит к постепенному снижению значений относительного удлинения при разрыве. Данный факт можно объяснить тем, что ТУ взаимодействует с макромолекулами каучука,

Таблица 2. Физико-механические свойства эластомеров на основе каучука БНКС-40 в зависимости от содержания ТУ

Table 2. Mechanical properties of elastomers based on NBR rubber depending on the content of carbon black

Свойства	Рецептуры						
	1	2	3	4	5	6	7
Свойства исходных вулканизатов							
ε <sub>p</sub> , %	503	403	361	289	224	200	122
f <sub>p</sub> , МПа	17,2	17,3	17,7	16,6	16,7	15,6	14,1
f <sub>100</sub> %, МПа	4,2	5,8	6,9	7,8	10,3	11,1	12,3
Н, Шор А, усл. ед.	77	80	83	86	90	91	93
ρ, г/см <sup>3</sup>	1,212	1,236	1,256	1,275	1,295	1,315	1,328
ΔV, см <sup>3</sup>	0,259	0,21	0,203	0,376	0,394	0,46	0,508
ΔQ, %	5,21	4,78	4,3	4,23	3,67	3,52	3,27
Свойства вулканизатов после термической обработки (100 °Сx72ч)							
ε <sub>p</sub> , %	375	318	294	229	162	140	102
f <sub>p</sub> , МПа	18,2	19,0	20,2	20,0	18,1	16,8	15,9
f <sub>100</sub> %, МПа	5,6	7,6	9,4	11,8	13,7	14,7	15,5
Н, Шор А	78	82	86	88	91	91	93
ρ, г/см <sup>3</sup>	1,215	1,239	1,266	1,280	1,301	1,318	1,33
ОДС, %	87,8	83,7	81,8	82,6	83,7	84,2	85,3
Δm, %	-0,97	-0,82	-0,78	-0,71	-0,74	-0,73	-0,66
Свойства вулканизатов после выдержки в воде (23 °Сx720ч)							
ε <sub>p</sub> , %	518	414	333	264	196	189	135
f <sub>p</sub> , МПа	17,6	17,1	17,3	17,0	16,4	16,3	15,7
f <sub>100</sub> %, МПа	4,1	5,5	7,0	8,4	10,9	11,2	12,6
Н, Шор А, усл. ед.	74	78	81	85	88	89	91
ρ, г/см <sup>3</sup>	1,211	1,236	1,259	1,28	1,297	1,316	1,327
Δm, %	1,8	1,84	1,85	1,85	1,83	1,83	1,89

ε<sub>p</sub> – относительное удлинение при разрыве, %; f<sub>p</sub> – условная прочность при разрыве, МПа; f<sub>100</sub> % – условное напряжение при удлинении на 100 %, МПа; Н – твердость по Шору А, Шор А; ρ – плотность, г/см<sup>3</sup>; ΔV – объемное истирание, см<sup>3</sup>; ОДС – остаточная деформация сжатия, %; ΔQ – степень набухания в среде масла АМГ-10, %; Δm – изменение массы, %.

ограничивая их подвижность, что приводит к снижению относительного удлинения [4]. При увеличении содержания ТУ от 60 до 80 масс.ч. прочностные характеристики композиций сохраняют стабильные значения в диапазоне от 17,2 до 17,7 МПа, что может свидетельствовать о достижении предела наполняющей способности матрицы. Так, дальнейшее увеличение содержания наполнителя ТУ приводит к постепенному снижению прочности. Твердость эластомеров демонстрирует прямую зависимость от количества ТУ, образец с 60 масс.ч. ТУ – 77 ед. Шор А, а со 120 масс.ч. ТУ – 93 ед. Шор А. Плотность материала возрастает пропорционально содержанию ТУ, что объясняется более высокой плотностью ТУ по сравнению с каучуком. Анализ ОДС выявил минимальное значение 87,8 % для образца БНКС-40 с содержанием 60 масс.ч. ТУ. Оптимальные показатели ОДС достигаются при концентрации наполнителя 80–90 масс.ч., что обусловлено эффективным заполнением межмолекулярного пространства полимерной матрицы.

С увеличением концентрации ТУ до 80 масс.ч. происходит улучшение стойкости к абразивному истиранию. Наилучшей износостойкостью характеризуется образец БНКС-40 с 80 масс.ч. ТУ – 0,203 см<sup>3</sup>, за счет увеличения количества связанных макромолекул каучука. При дальнейшем росте концентрации ТУ наблюдается существенное повышение потери объема при истирании. В работе [7] наблюдается похожее повышение износостойкости при введении углеродных нанотрубок в бутадиен-нитрильную матрицу вследствие существенного увеличения прочностных свойств эластомера. Испытания стойкости к воздействию гидравлическому маслу АМГ-10 показали, что при повышении концентрации ТУ в резиновой смеси снижается степень набухания образцов в углеводородной среде. Наилучшую стойкость к гидравлическому маслу имеет эластомер с 120 масс.ч. ТУ, что объясняется максимальным содержанием наполнителя в матрице. Введение частиц ТУ в эластомер увеличивает плотность материала и сокращает свободный объем, что препятствует проникновению жидкости внутрь эластомера [8].

После испытания образцов на термическое старение наблюдается снижение относительного удлинения при разрыве по сравнению с исходными значениями. Наибольшее снижение выявлено в образце с содержанием 60 масс.ч. ТУ, что на 25 % ниже исходного материала. Условная прочность образцов увеличивается, где наибольшее значение выявлено в эластомере, содержащем 80 масс.ч. ТУ. Твердость образцов увеличивается на 1–3 показателя после термического воздействия. В ходе термического старения интенсифицируются деструкционные процессы, в которых протекают окислительные реакции макромолекул каучука и образование новых соединений. Это приводит к увеличению сопротивления деформации при внешнем воздействии и, как следствие, к снижению относительного удлинения, повышению прочности и твердости. В эластомерных образцах наблюдается незначительное увеличение плотности, вероятно, из-за улетучивания легких фракций. Масса образцов после термической обработки уменьшается. Наибольшая потеря массы отмечена у образца с 60 масс.ч. ТУ, но с увеличением концентрации ТУ процент изменения плотности и потери массы снижается. Испытание влияния термического воздействия показало, что происходят изменения основных физико-механических свойств эластомеров вследствие термоокислительных реакций [9].

Выдержка эластомерных образцов при комнатной температуре в течение 30 суток в воде не привело к изменению упруго-прочностных свойств, твердость несколько снизилась, особенно у состава с 60 масс.ч. ТУ, что связано с размягчающим действием воды. При этом плот-

ность материалов осталась неизменной, но происходит увеличение массы, возможно, из-за впитывания влаги. В работе [10] показано, что вода оказывает релаксационное воздействие на полимерный материал. Эти данные согласуются с полученными результатами, что вода действует как временный пластификатор, не вызывая существенного изменения основных физико-механических характеристик. Стабильность плотности может объясняться либо незначительностью изменений, либо методическими ограничениями измерения.

Результаты исследования температуры стеклования эластомеров методом дифференциально сканирующей калориметрии приведены на рис. 1. Видно, что температуры начала и завершения перехода эластомерных образцов из стеклообразного состояния в высокоэластичное приблизительно равны и находятся в диапазоне от  $-16,8$  до  $-11,3$  °С. Данный факт можно объяснить тем, что методом ДСК фиксируется начало и завершение фазового перехода из стеклообразного состояния макромолекул каучука, а в случае с термостабильным и инертным ТУ не происходит никаких фазовых преобразований в исследуемом температурном диапазоне. Таким образом, содержание ТУ в эластомерной матрице не оказывает значимого влияния на температуру стеклования. Полученные данные согласуются с результатами исследования [11], где также показано, что изменение концентрации ТУ в бутадиеновом эластомере не влияет на температуру стеклования.

На рис. 2 приведены графики изменения линейных размеров эластомерных образцов в зависимости от изменения температуры, полученных методом термомеханического анализа. С увеличением концентрации ТУ происходит смещение начала сегментальной подвижности макромолекул каучука в сторону высоких температур при переходе эластомеров из стеклообразного состояния в высокоэластичное. По кривым термомеханического анализа видно, что с увеличением температуры эластическая деформация проявляется при температурах от  $-8,8$  до  $-3,2$  °С, затем наблюдается постепенное размягчение и продавливание поверхности образца индентором. Далее с ростом температуры происходит увеличение подвижности макромолекул каучука, и за счет этого происходит выталкивание индентора, что фиксируется ростом

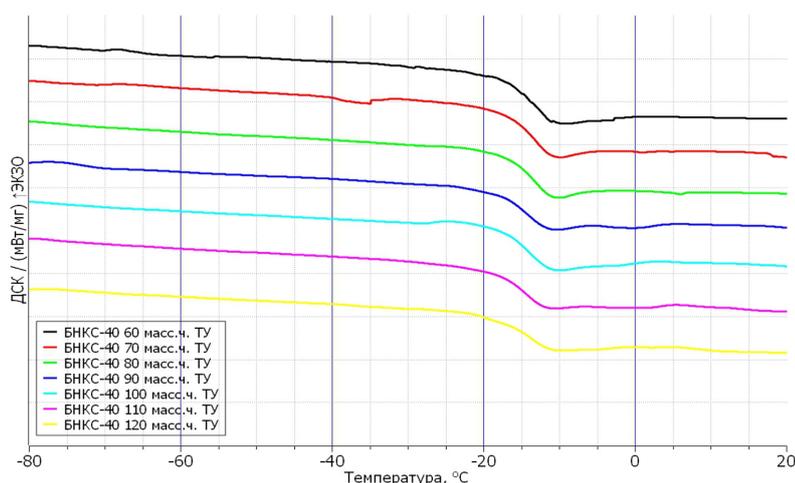


Рис. 1. Температура стеклования эластомеров на основе каучука БНКС-40 с различным содержанием ТУ

Fig. 1. The glass transition temperature of elastomers based on NRB rubber with varying carbon black content

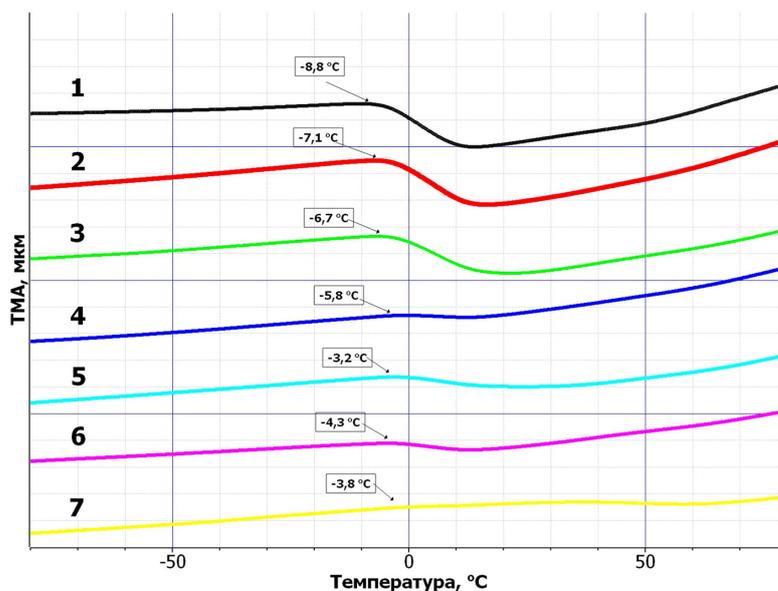


Рис. 2. Кривые термомеханического анализа БHKC-40: 1–60 масс.ч. ТУ; 2–70 масс.ч. ТУ; 3–80 масс.ч. ТУ; 4–90 масс.ч. ТУ; 5–100 масс.ч. ТУ; 6–110 масс.ч. ТУ; 7–120 масс.ч. ТУ

Fig. 2. Thermomechanical analysis curves of NRB: 1–60 phr carbon black; 2–70 phr carbon black; 3–80 phr carbon black; 4–90 phr carbon black; 5–100 phr carbon black; 6–110 phr carbon black; 7–120 phr carbon black

кривой. По графикам отмечается, что с увеличением концентрации ТУ в эластомере происходит уменьшение изменения линейных размеров эластомерных образцов при изменении температуры. Возможно, это связано с уменьшением эластичности материалов, что согласуется с результатами измерения упруго-прочностных показателей. Также в работе [11] показано, что при увеличении содержания ТУ происходит изменение начала сегментальной подвижности бутадиеновых эластомеров в сторону высоких температур.

На рис. 3 приведена микроструктура в объеме образцов с различным содержанием ТУ. На микрофотографиях наблюдается равномерное распределение ТУ в эластомерной матрице без образования крупных агломератов. В образцах с 60, 70 и 80 масс.ч. ТУ (рис. 3а, б, в) рельеф поверхности имеет более гладкую морфологию по сравнению с эластомерами при большом содержании ТУ, что отражается на показателях относительного удлинения и условной прочности. В образцах, содержащих 90 и более масс.ч. ТУ (рис. 3г, д, е, ж), морфология имеет более рельефные поверхности, что связано с перенасыщением наполнителем эластомерной матрицы. Вследствие этого происходит снижение упруго-прочностных свойств эластомеров по причине увеличения концентраторов напряжения.

На рис. 4 приведена микроструктура поверхностей эластомеров после испытания на износостойкость. На поверхности трения эластомеров формируются борозды при трении по абразивной поверхности. Анализ микрофотографий показывает, что у образцов с содержанием 60, 70 и 80 масс.ч. ТУ (рис. 4а, б, в) поверхность трения отличается более широкими бороздами от 20 до 40 мкм. В образцах с 90 и более масс.ч. ТУ (рис. 4г, д, е, ж) наблюдается уменьшение ширины борозд при увеличении их количества на единицу площади, размер борозд снижается до 5–15 мкм. Этот эффект объясняется тем, что при абразивном изнаши-

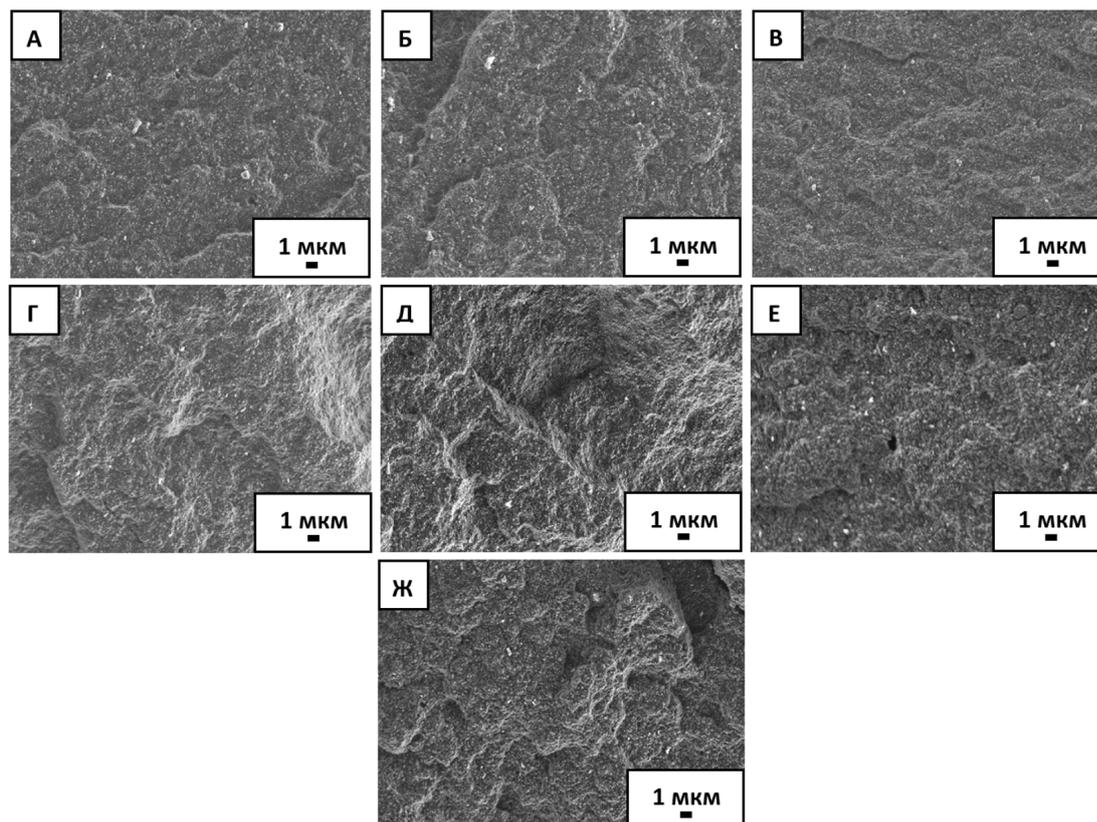


Рис. 3. Микроструктура бутадиен-нитрильных эластомеров в зависимости от содержания ТУ: а) 60 масс.ч. ТУ; б) 70 масс.ч. ТУ; в) 80 масс.ч. ТУ; г) 90 масс.ч. ТУ; д) 100 масс.ч. ТУ; е) 110 масс.ч. ТУ; ж) 120 масс.ч. ТУ

Fig. 3. Microstructure of butadiene-nitrile elastomers depending on the content of carbon black: a) 60 phr carbon black; b) 70 phr carbon black; c) 80 phr carbon black; d) 90 phr carbon black; e) 100 phr carbon black; f) 110 phr carbon black; g) 120 phr carbon black

вании происходит интенсивный обрыв макромолекул каучука из-за образования множества концентраторов напряжения, вызванного перенасыщением эластомерной матрицы частицами ТУ.

По результатам работы были изготовлены уплотнительные кольца для расходомера FIP FLS M9.02 итальянского производства, измеряющего количество подаваемого хлора в систему водоснабжения. На рис. 5 приведены фотографии установленных уплотнительных колец и прибор, подключенный в систему. Для изготовления герметизирующих колец выбрана резиновая смесь, содержащая 80 масс.ч. ТУ, которая продемонстрировала оптимальные характеристики для работы в качестве уплотнительного элемента в водной среде при положительных температурах. Опытные образцы были внедрены 4 апреля 2023 года в узле дозирования гипохлорита натрия на расходомере, установленном в электролизном отделении водозаборных сооружений АО «Водоканал» (г. Якутск). По состоянию на 20 мая 2025 года уплотнительные кольца сохраняют работоспособность и продолжают эксплуатироваться без признаков деградации. Таким образом, срок их успешной эксплуатации превысил 2 года, мониторинг технического состояния продолжается.

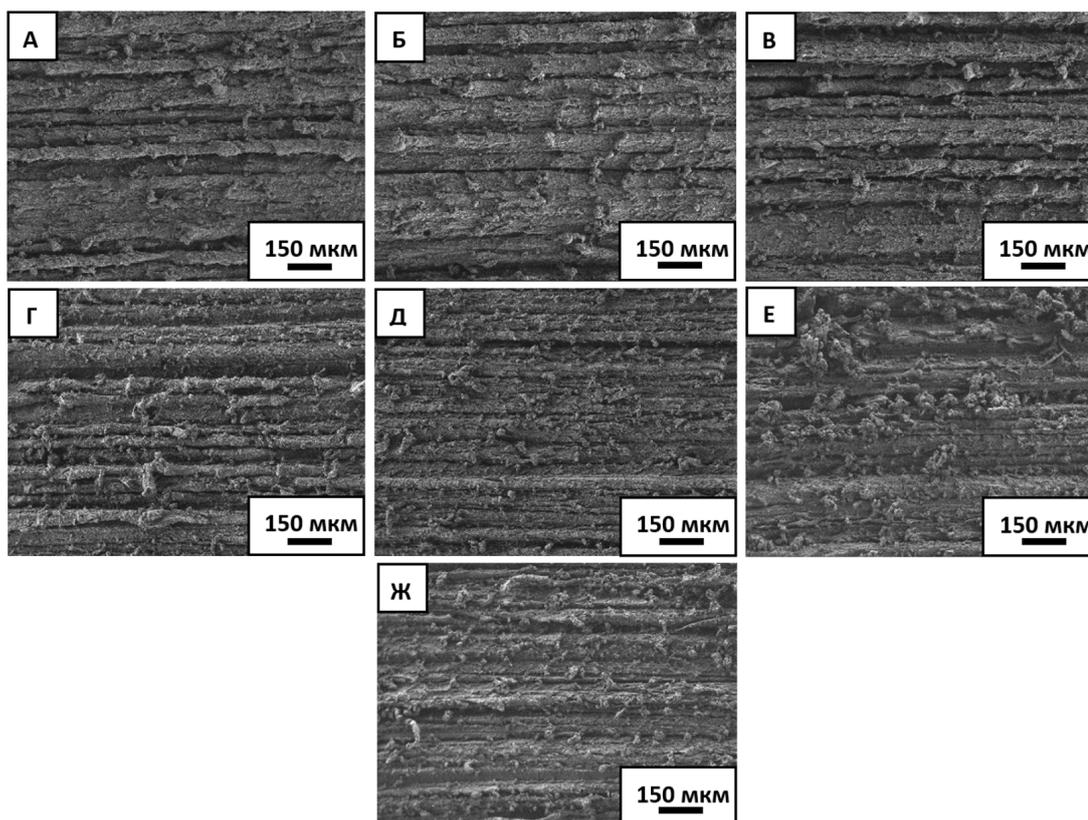


Рис. 4. Микроструктура поверхности эластомеров после испытания на износостойкость в зависимости от содержания ТУ: а) 60 масс.ч. ТУ; б) 70 масс.ч. ТУ; в) 80 масс.ч. ТУ; г) 90 масс.ч. ТУ; д) 100 масс.ч. ТУ; е) 110 масс.ч. ТУ; ж) 120 масс.ч. ТУ

Fig. 4. The surface microstructure of elastomers after wear resistance testing as a function of carbon black content: a) 60 phr carbon black; b) 70 phr carbon black; c) 80 phr carbon black; d) 90 phr carbon black; e) 100 phr carbon black; f) 110 phr carbon black; g) 120 phr carbon black

### Выводы

По результатам проведенных исследований физико-механических свойств и структурных параметров резиновых смесей на основе каучука БНКС-40 с различным содержанием ТУ установлено, что:

1. Повышение содержания ТУ в резиновых смесях приводит к значительным изменениям их свойств: при 60 масс.ч. ТУ наблюдается максимальное относительное удлинение, при 80 масс.ч. достигаются оптимальные показатели износостойкости и стабильной прочности. Дальнейшее увеличение концентрации ТУ приводит к снижению механических характеристик из-за перенасыщения системы. Твердость и плотность резин напрямую зависят от содержания ТУ, а стойкость к набуханию в углеводородных средах улучшается пропорционально количеству наполнителя, достигая максимума при 120 масс.ч.

2. Термическое старение приводит к значительным изменениям свойств эластомеров: снижению относительного удлинения, росту условной прочности, незначительному росту плотности, причем с увеличением содержания ТУ эти эффекты ослабевают.

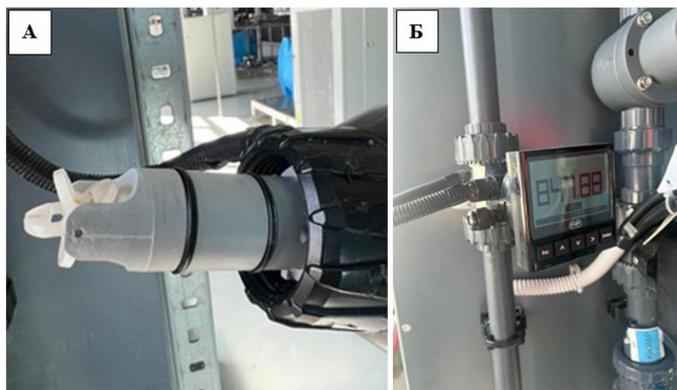


Рис. 5. Расходомер-преобразователь FIP M9.02.01: а) уплотнительные кольца на соединительную часть расходомера; б) монитор расходомера, подключенного в систему водоснабжения

Fig. 5. Flowmeter transducer FIP M9.02.01: a) sealing rings on the flowmeter connection assembly; b) flowmeter monitor integrated into the water supply system

3. Выдержка образцов в течение 30 суток при комнатной температуре не изменила прочностные характеристики эластомеров, привела к снижению твердости из-за пластифицирующего действия воды, произошло увеличение массы при относительно стабильной плотности.

4. Эластомерные материалы обладают температурой стеклования от  $-16,8$  до  $-11,3$  °С, количество содержащегося ТУ не оказывает влияния на температуру стеклования. Сегментальная подвижность образцов начинает проявляться в температурном диапазоне от  $-8,8$  до  $-3,2$  °С, смещаясь в сторону высоких температур с увеличением содержания ТУ.

5. При увеличении содержания ТУ до 80 масс.ч. структура эластомера имеет более гладкую поверхность, с дальнейшим увеличением наблюдается образование резких перепадов. Поверхность трения у образцов с 60, 70 и 80 масс.ч. ТУ отличается от остальных тем, что имеет более широкие бороздки.

6. По разработанной рецептуре резиновой смеси БНКС-40 с 80 масс.ч. ТУ были изготовлены уплотнительные кольца и внедрены в АО «Водоканал» г. Якутска для герметизации расходомера FIP M9.02.01. Внедрение опытных образцов было произведено 4 апреля 2023 года на расходомере дозирования гипохлорита натрия. Срок применения экспериментальных образцов превышает 2 года, наблюдение за их техническим состоянием продолжается.

#### Список литературы / References

[1] Мартин Д. М., Смит У. К. *Производство и применение резинотехнических изделий*, СПб.: Профессия, 2013, 480. [Martin D. M., Smith U. K. *Production and application of rubber products*, St. Petersburg: Profession, 2013, 480. (in Russian)].

[2] Мокина Е. С., Шеин А. Б. Исследование влияния удельной поверхности технического углерода на технологические и физико-механические свойства резин, *Вестник Пермского университета. Химия*, 2013, 3(11), 75–80 [Mokina E. S., Shein A. B. Investigation of the effect of the specific surface area of carbon black on the technological and physico-mechanical properties of rubbers, *Bulletin of the Perm University. Chemistry*, 2013, 3(11), 75–80 (in Russian)].

[3] Княжева О. А., Бакланова О. Н., Лавренов А. В., Жансакова К. С., Русских Г. С., Лихолобов В. А. Влияние механической активации на физико-химические свойства технического углерода и наполненных им резиновых смесей, *Журнал Сибирского федерального университета. Химия*, 2018, 11(4), 552–563 [Knyazeva O. A., Baklanova O. N., Lavrenov A. V., Zhansakova K. S., Russkikh G. S., Likholobov V. A. The effect of mechanical activation on the physico-chemical properties of carbon black and rubber compounds filled with it, *J. Sib. Fed. Univ. Chemistry*, 2018, 11(4), 552–563 (in Russian)].

[4] Корнев Ю. В., Юмашев О. Б., Жогин В. А., Гамлицкий Ю. А., Швачич М. В., Буканов А. М. Влияние модификации технического углерода на свойства резин, *Каучук и резина*, 2008, 1, 14–18 [Kornev Yu. V., Yumashev O. B., Zhogin V. A., Gamlitsky Yu. A., Shvachich M. V., Bukanov A. M. The effect of carbon black modification on the properties of rubbers, *Rubber and rubber*, 2008, 1, 14–18 (in Russian)].

[5] Раздьяконова Г. И., Кохановская О. А. Модификация технического углерода окислением как способ получения его разновидностей, *Каучук и резина*, 2013, 3, 28–29 [Razdiakonova G. I., Kokhanovskaya O. A. Modification of carbon black by oxidation as a method of obtaining its varieties, *Rubber and rubber*, 2013, 3, 28–29 (in Russian)].

[6] Макаров И. С., Дьяконов А. А., Петрова Н. Н., Охлопкова А. А., Лазарева Н. Н., Кычкин А. К., Кычкин А. А., Туисов А. Г., Винокуров П. В., Гладкина Н. П. Исследование влияния технического углерода на свойства изопреновых эластомеров, *Ползуновский вестник*, 2022, 1, 154–163 [Makarov I. S., Dyakonov A. A., Petrova N. N., Okhlopko A. A., Lazareva N. N., Kuchkin A. K., Kuchkin A. A., Tuisov A. G., Vinokurov P. V., Gladkina N. P. Investigation of the effect of carbon black on the properties of isoprene elastomers, *Polzunovsky Vestnik*, 2022, 1, 154–163 (in Russian)].

[7] Морозов А. В., Буковский П. О., Петрова Н. Н., Тимофеева Е. Н. Повышение износостойкости морозостойких резин за счет армирования многостенными углеродными нанотрубками, *Каучук и резина*, 2019, 78(6), 356–363 [Morozov A. V., Bukovsky P. O., Petrova N. N., Timofeeva E. N. Increasing the wear resistance of frost-resistant rubbers due to reinforcement with multi-walled carbon nanotubes, *Rubber and Rubber*, 2019, 78(6), 356–363 (in Russian)].

[8] Ковалева Л. А., Овсянников Н. Я. Исследование параметров пористой структуры технического углерода и их влияния на свойства резин, *Наука без границ*, 2017, 11(16), 53–59 [Kovaleva L. A., Ovsyannikov N. Ya. Investigation of the parameters of the porous structure of carbon black and their effect on the properties of rubbers, *Science without Borders*, 2017, 11(16), 53–59 (in Russian)].

[9] Новаков И. А., Новопольцева О. М., Соловьева Ю. Д., Кучин А. В., Чукичева И. Ю. Оценка стабилизирующего действия терпенофенолов на термоокислительную деструкцию резиновых смесей на основе бутадиен-стирольных каучуков, *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*, 2012, 55(12), 90–93 [Novakov I. A., Novopoltseva O. M., Solovyova Yu. D., Kuchin A. V., Chukicheva I. Y. Evaluation of the stabilizing effect of terpenophenols on the thermal oxidative degradation of rubber compounds based on styrene butadiene rubbers, *News of higher educational institutions. Chemistry and Chemical Technology*, 2012, 55(12), 90–93 (in Russian)].

[10] Смотрина Т. В., Смотрин В. А., Стоянов О. В. Молекулярная подвижность и процессы протонной магнитной релаксации в системе полимер-вода, *Вестник Казанского технологиче-*

*ского университета*, 2014, 17(14), 310–313 [Smotrina T. V., Smotrin V. A., Stoyanov O. V. Molecular mobility and proton magnetic relaxation processes in the polymer-water system, *Bulletin of Kazan Technological University*, 2014, 17(14), 310–313 (in Russian)].

[11] Макаров И. С., Дьяконов А. А., Спиридонов А. М., Стручкова Т. С., Охлопкова А. А., Петрова Н. Н., Лазарева Н. Н., Туисов А. Г., Кычкин А. К. Влияние содержания технического углерода на свойства бутадиенового эластомера, *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2023, 16(8), 977–985. [Makarov I. S., Dyakonov A. A., Spiridonov A. M., Struchkova T. S., Okhlopko A. A., Petrova N. N., Lazareva N. N., Tuisov A. G., Kychkin A. K. The effect of carbon black content on the properties of butadiene elastomer, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2023, 16(8), 977–985 (in Russian)].

EDN: CAEELI

УДК 621.313.333:621.3.07

## Investigation of the Effectiveness of the Loss Reduction Method when Testing Induction Machines Using SimInTech Dynamic Modeling Environments

Denis I. Popov\* and Erbol I. Minzhasov  
*Omsk State Transport University (OSTU)*  
*Omsk, Russian Federation*

Received 18.06.2025, received in revised form 25.10.2025, accepted 13.11.2025

**Abstract.** It is noted that one of the ways to increase the efficiency of operation and expand the scope of asynchronous electric drives is to improve their testing systems. At the same time, the efficiency of electric drives is increased through the development and implementation of new circuits.

The article analyzes the process of testing electric machines by the method of mutual loading, where an asynchronous machine is used as a load. The known schemes of mutual loading of asynchronous machines are considered, classified according to the method of transferring electricity from the load machine to the test motor – through a direct current link or an alternating current network. For the considered circuits, a method is proposed to increase energy efficiency by jointly regulating the frequency of the alternating voltage and its effective value applied to the stator winding of the loading machine. To study the effectiveness of the loss reduction method, a simulation model has been developed in the SimInTech dynamic modeling environment. The results of simulation modeling on machines of various capacities showed a significant reduction in power losses, which reduces the load on the power grid and reduces the cost of implementing and operating such test systems.

**Keywords:** loss reduction, induction machine, frequency converter, mutual load method, voltage regulation.

Citation: Popov D. I., Minzhasov E. I. Investigation of the Effectiveness of the Loss Reduction Method when Testing Induction Machines Using SimInTech Dynamic Modeling Environments. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2025, 18(8), 1062–1071. EDN: CAEELI



© 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: popovomsk@yandex.ru

# Исследование эффективности способа снижения потерь при испытаниях асинхронных машин с применением среды динамического моделирования SimInTech

Д. И. Попов, Е. И. Минжасов  
Омский государственный университет  
путей сообщения (ОмГУПС)  
Российская Федерация, Омск

**Аннотация.** В работе отмечено, что одним из способов повышения эффективности эксплуатации и расширения области применения асинхронных электроприводов является совершенствование их систем испытания. При этом эффективность работы электроприводов повышается путем разработки и внедрения новых схем.

В статье выполнен анализ процесса испытаний электрических машин методом взаимной нагрузки, где в качестве нагрузочной применяется асинхронная машина. Рассмотрены известные схемы взаимной нагрузки асинхронных машин, классифицируемые по способу передачи электроэнергии от нагрузочной машины к испытуемому двигателю – через звено постоянного тока или сеть переменного тока. Для рассматриваемых схем предложен способ повышения энергетической эффективности за счет совместного регулирования частоты переменного напряжения и его действующего значения, подаваемого на обмотку статора нагрузочной машины. Для исследования эффективности способа снижения потерь разработана имитационная модель в среде динамического моделирования SimInTech. Результаты имитационного моделирования на машинах различной мощности показали значительное снижение потерь мощности, что снижает нагрузку на электросеть и уменьшает затраты на внедрение и эксплуатацию подобных систем испытания.

**Ключевые слова:** снижение потерь, асинхронная машина, преобразователь частоты, метод взаимной нагрузки, регулирование напряжения.

Цитирование: Попов Д. И. Исследование эффективности способа снижения потерь при испытаниях асинхронных машин с применением среды динамического моделирования SimInTech / Д. И. Попов, Е. И. Минжасов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(8). С. 1062–1071. EDN: CAEELI

## Введение

В настоящее время выполняются многочисленные научные работы, направленные на расширение области применения и повышение эффективности эксплуатации асинхронных электроприводов за счет совершенствования их систем управления [1–6]. Повышение эффективности работы электроприводов обеспечивается разработкой и внедрением новых схем с модернизированной силовой или измерительной частью, а также принципов управления статическими преобразователями на основе более совершенных алгоритмов работы.

При осуществлении нагрузочных испытаний асинхронных двигателей им, как правило, необходимо обеспечить параметры питающего напряжения (действующее значение и частоту), соответствующие их номинальным значениям. Данные значения для параметров питающего напряжения генератора могут варьироваться.

### Основная идея

В настоящей работе представлен способ снижения потерь в схеме взаимной нагрузки асинхронных машин (АМ). Полученное в данном случае повышение энергетической эффективности достигается за счет совместного регулирования частоты переменного напряжения и его действующего значения, подведенного к нагрузочной асинхронной АМ, по разработанному алгоритму.

Известные схемы взаимной нагрузки АМ можно классифицировать в зависимости от пути возврата электроэнергии от нагрузочной машины к испытуемому двигателю. Данная характеристика схем испытаний позволяет выделить два их типа:

- обмен электроэнергией по звену постоянного тока (ЗПТ) (рис. 1а);
- обмен электроэнергией по сети переменного тока (рис. 1б) [7].

Приведенные схемы имеют идентичную силовую часть: асинхронный двигатель, который подвергается испытаниям (АД) 1, нагрузочная АМ 2, муфтовое соединение валов 3 и управляемый выпрямитель-инвертор 4 (инвертор напряжения).

На рис. 1 имеются следующие элементы, не являющиеся общими для приведенных схем: 5 – неуправляемый выпрямитель или управляемый выпрямитель-инвертор (возможен тот или иной вариант в зависимости от выбранной схемы), 6 – звено постоянного тока. На рис. 1а питание испытуемого асинхронного двигателя 1 осуществляется за счет подачи на обмотку статора переменного трехфазного напряжения синусоидальной формы. На рис. 1б соответствующее напряжение сформировано прямоугольными импульсами посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Фрагмент схем взаимной нагрузки АМ, состоящий из силовой части (элементы 1–4: имеют обозначения, соответствующие рис. 1), включающей общие элементы приведенных выше схем, изображен на рис. 2. Данный фрагмент схем дополнен следующими элементами, не относящимися

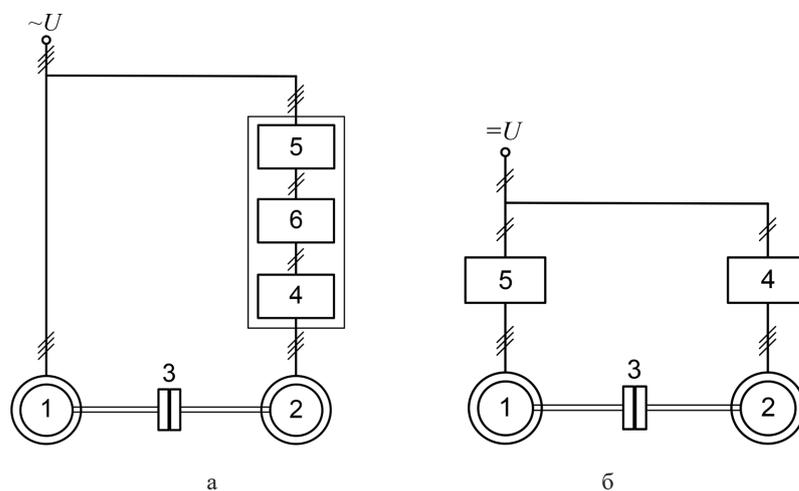


Рис. 1. Фрагменты схем взаимной нагрузки АМ: а – обмен электроэнергией осуществлен по сети переменного тока; б – обмен электроэнергией осуществлен по ЗПТ

Fig. 1. Fragments of asynchronous machine mutual load schemes: а – the exchange of electricity was carried out over an alternating current network; б – the exchange of electricity is carried out via a direct current link

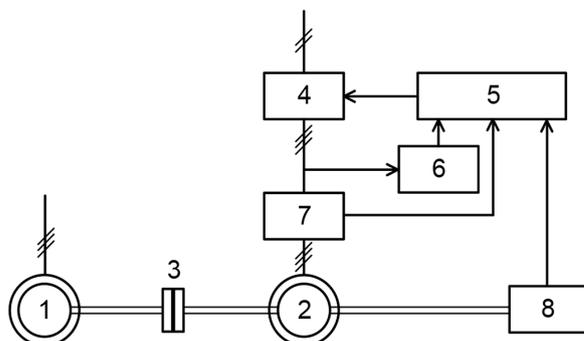


Рис. 2. Общий фрагмент схем испытания АМ

Fig. 2. A general fragment of asynchronous machine testing schemes

к силовой части: системой управления 5, вычислителем частоты напряжения 6, электрическими датчиками 7 и датчиком частоты вращения 8.

В данной схеме питание испытуемого АД 1 осуществляется переменным трехфазным напряжением вне зависимости от формы данного напряжения (синусоидальная или сформированная посредством ШИМ). Силовой вход управляемого выпрямителя-инвертора 4 подключен к источнику постоянного напряжения (например, неуправляемому выпрямителю). Схема, приведенная на рис. 2, позволяет осуществить предлагаемый способ снижения потерь мощности в нагрузочной АМ.

### Имитационное моделирование

С целью исследования эффективности способа снижения потерь разработана имитационная модель в среде динамического моделирования SimInTech, которая позволяет значительно упростить процесс моделирования сложных технических систем за счет сборки схемы из готовых блоков, имеющих в «библиотеке». При этом у исследователя имеется возможность доступа к информации (математическим выражениям) по каждому блоку и их корректировки при необходимости.

Отображение блок-схемы имитационной модели в среде динамического моделирования SimInTech приведено на рис. 3.

Имитационная модель системы испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки в среде динамического моделирования SimInTech состоит из испытуемого асинхронного двигателя АД1 и нагрузочной асинхронной машины АД2, питающихся от преобразователей частоты (ПЧ). ПЧ получают питание от трансформатора  $T$ , подключенного к сети  $E$ . ПЧ состоят из трехфазных шестипульсовых диодных выпрямителей  $UZ1$  и  $UZ3$  и управляемых выпрямителей-инверторов  $UZ2$  и  $UZ4$ . В ЗПТ ПЧ включены емкости  $C 1$  и  $C 2$ . Валы АД1 и АД2 имеют жесткую механическую связь. Механическая часть модели помимо механической связи валов состоит из блока, задающего момент инерции  $J$ , датчика вращательного движения  $D$ , блока, задающего трение,  $Tc$  и заделки  $Z$ . Для связи валов асинхронных двигателей с остальными элементами механической части модели используются блоки  $M1$  и  $M2$ .

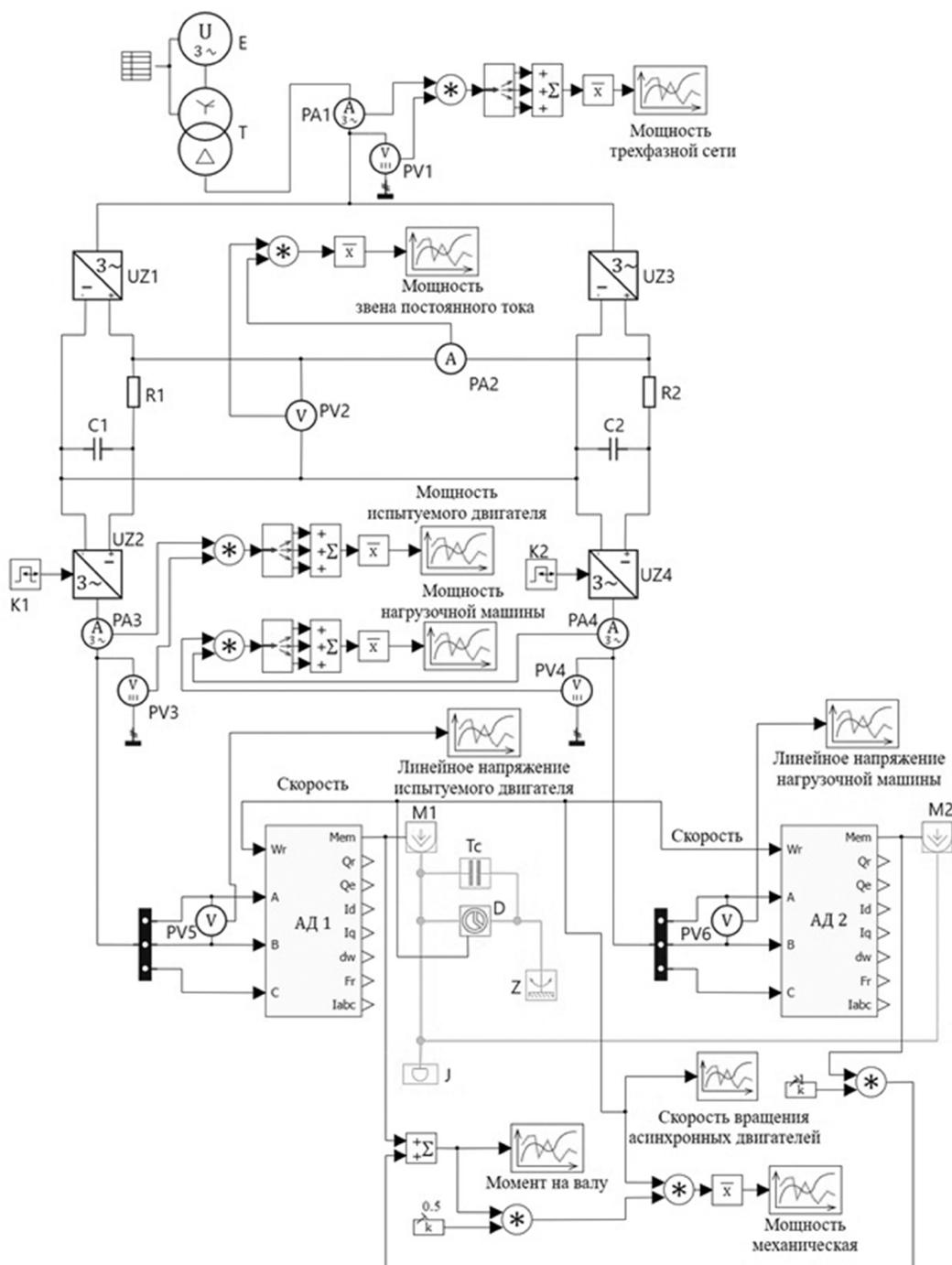


Рис. 3. Блок-схема имитационной модели системы испытания АМ в среде динамического моделирования SimInTech

Fig. 3. Flowchart of the simulation model of the asynchronous machine testing system in the SimInTech dynamic modeling environment

Суть разработанного способа снижения потерь при испытаниях АМ заключается в следующем. На первом этапе перед нагружением асинхронных машин осуществляется их запуск. Запуск АД1 и АД2 осуществляют путем увеличения частоты и действующего значения питающих их напряжений до номинальных величин. После пуска АМ оказываются работающими в установившемся режиме без нагрузки на валу.

На следующем этапе производится нагружение испытуемого двигателя и вывод его на режим с номинальной нагрузкой на валу только за счет снижения частоты напряжения, питающего нагрузочную АМ.

Далее для поиска точки максимума мощности, вырабатываемой нагрузочной АМ, пошагово уменьшают частоту питающего его напряжения и подбирают такое действующее значение напряжения, при котором снова будет обеспечена номинальная нагрузка на валу. При этом будет наблюдаться рост мощности, вырабатываемой нагрузочной АМ. Снижение частоты питающего напряжения и подбор его действующего значения, обеспечивающего номинальную нагрузку на валу, многократно повторяют до достижения максимума вырабатываемой мощности. Судить о достижении точки максимума можно по приращению/убыли мощности нагрузочной АМ на каждом шаге уменьшения частоты напряжения.

Для представленного в данной работе исследования выбраны АМ типов IMM71В 4У2 и рДМ180 LB 40М5 со значительно различающимися значениями номинальной мощности – 0,37 и 30 кВт соответственно [8]. Основные номинальные параметры АМ и параметры их обмоток, определенные по методике, представленной в источнике [9], приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры асинхронных машин

Table 1. Parameters of asynchronous machines

Параметр	Тип машины	
	IMM71В 4У2	рДМ180 LB 40М5
	Значение параметра	
Номинальная мощность, кВт	0,37	30
Номинальный КПД, %	0,65	0,882
Число пар полюсов	2	2
Сопrotивление статора, Ом	35,98	0,21
Сопrotивление ротора, Ом	23,3	0,11
Индуктивность намагничивания, Гн	0,87	0,02
Индуктивность рассеяния статора, Гн	0,041	0,001
Индуктивность рассеяния ротора, Гн	0,041	0,001

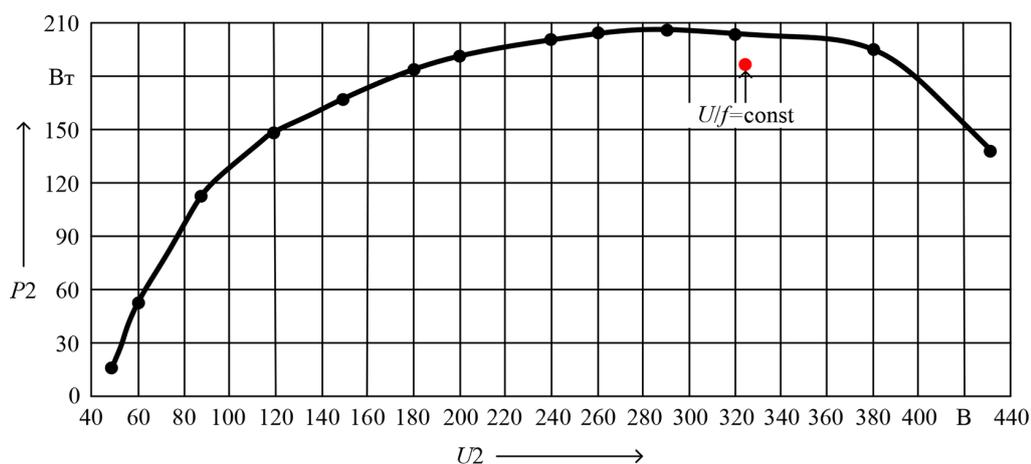
АД с короткозамкнутым ротором типа рДМ180 LB40М5 применяется в системе электропривода компрессоров электровоза постоянного тока 2ЭС10 [10].

### Анализ результатов имитационного моделирования

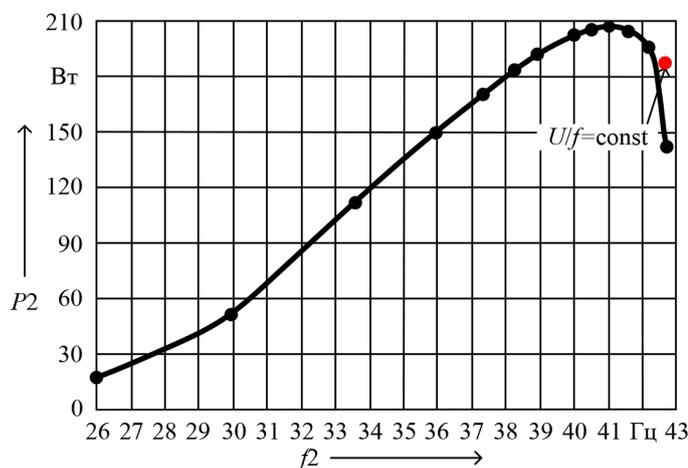
В результате имитационного моделирования системы испытания с АМ типа IMM71В 4У2 получены зависимости максимальной вырабатываемой мощности нагрузочной АМ от параметров подведенного к нему напряжения, представленные на рис. 4.

Аналогичные зависимости, полученные в среде динамического моделирования SimInTech для системы испытаний с АМ типа рДМ180 LB 40М5, приведены на рис. 5.

Анализ представленных результатов, полученных в среде динамического моделирования SimInTech, показал, что потери мощности в нагрузочной АМ в рассмотренных схемах испытаний в значительной степени зависят от принципа регулирования преобразователем частоты и имеют потенциал к уменьшению.



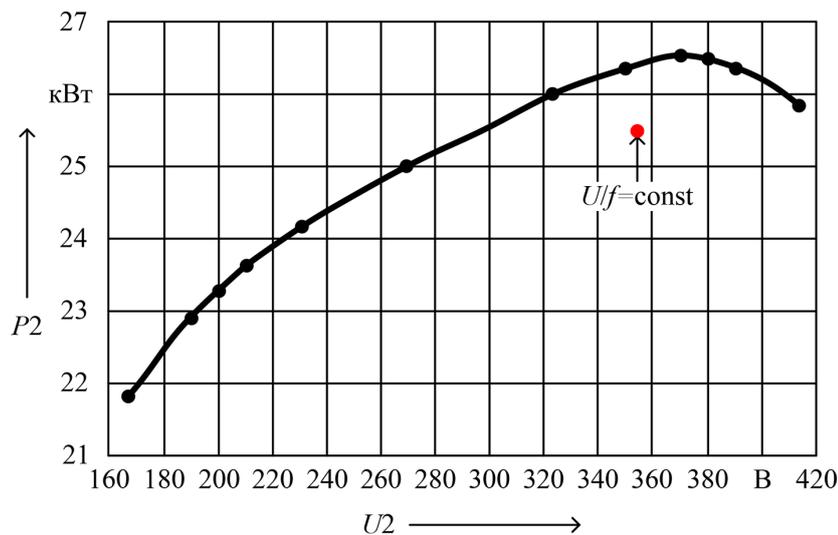
а



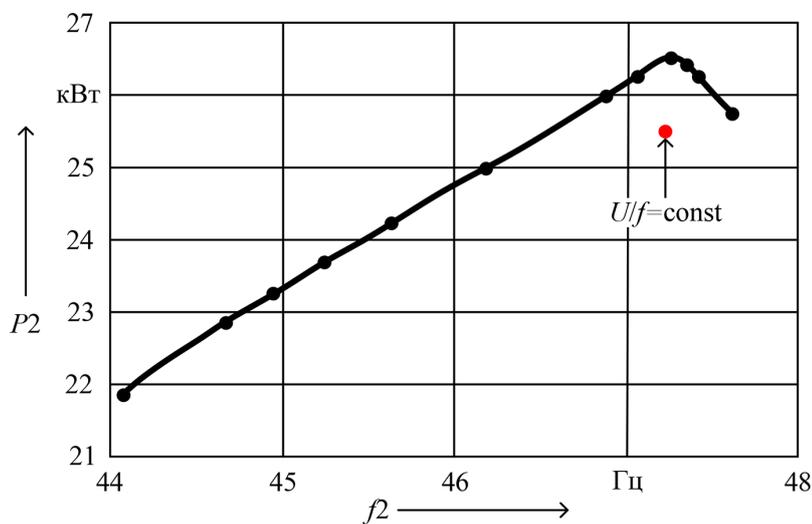
б

Рис. 4. Зависимости максимальной мощности, вырабатываемой нагрузочной АМ (типа IMM71В 4У2), от параметров напряжения: а – действующего значения; б – частоты

Fig. 4. The dependence of the maximum power generated by the load asynchronous machine (type IMM71В4У2) on the voltage parameters: а – the current value; б – frequency



а



б

Рис. 5. Зависимости максимальной мощности, вырабатываемой нагрузочной АМ (типа рДМ180 LB 40M5), от параметров напряжения: а – действующего значения; б – частоты

Fig. 5. The dependence of the maximum power generated by the load asynchronous machine (type рДМ180 LB 40M5) on the voltage parameters: а – the current value; б – frequency

В соответствии с результатами моделирования, представленными на рис. 4, снижение потерь в нагрузочной АМ при достижении точки максимума по сравнению с потерями, которые будет иметь данная машина при регулировании по закону  $U/f = \text{const}$ , составляет около 10 %. Это соответствует снижению потерь установки из двух машин на 5 %

Анализ результатов моделирования, представленных на рис. 5, показал, что для АД большей мощности (типа рДМ180 LB 40M5) графики имеют принципиально такой же характер, что и для машин малой мощности. При этом за счет регулирования предложенным способом

можно уменьшить потери в нагрузочной АМ, по сравнению со случаем регулирования по закону  $U/f = \text{const}$ , примерно на 22 %, потери в установке из двух машин снизятся соответственно на 12 %.

### Вывод

Учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод о достаточно высокой эффективности предложенного метода снижения потерь в системах, предназначенных для испытаний АМ. Практическая значимость данного эффекта заключается в снижении нагрузки на сеть, питающую электротехническую систему. Таким образом, данный эффект обеспечивает как снижение капитальных затрат на эксплуатацию подобных систем испытаний АМ, так и снижение требований к установленной мощности питающей сети при проектировании и внедрении новой системы испытаний АМ.

### Список литературы / References

- [1] Завьялов В.М., Неверов А.А., Семькина И.Ю. Многокритериальное управление асинхронным электроприводом. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, 2005, 1(45), 81–84 [Zavyalov V.M., Neverov A.A., Semykina I. Yu. Multi-criteria asynchronous electric drive control, *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2005, 1(45), 81–84 (in Russian)].
- [2] Завьялов В.М., Семькина И.Ю. Энергооптимальное управление скоростью асинхронного электропривода. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, 2005, 4–2(49), 21–23 [Zavyalov V.M., Semykina I. Yu. Energy-optimal speed control of asynchronous electric drive, *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2005, 4–2(49), 21–23 (in Russian)].
- [3] Мельниченко О.В., Иванов В.С. Анализ применения преобразователей в силовых схемах отечественного моторвагонного подвижного состава переменного тока. *Вестник Иркутского государственного технического университета*, 2018, 22(4(135)), 231–242 [Melnichenko O.V., Ivanov V.S. Analysis of the use of converters in power circuits of domestic AC motor-car rolling stock, *Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2018, 22(4(135)), 231–242 (in Russian)].
- [4] Глазырин А.С., Кладиев С.Н., Афанасьев К.С. [и др.]. Разработка наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления для погружных асинхронных электродвигателей. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 2018, 329(2), 118–126 [Glazyrin A.S., Kladiev S.N., Afanasyev K.S. [and others]. Development of a full-order observer with operational monitoring of the moment of resistance for submersible asynchronous electric motors, *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering*, 2018, 329(2), 118–126 (in Russian)].
- [5] Семькина И.Ю., Кипервассер М.В., Герасимук А.В. Математическое моделирование неисправностей насосно-компрессорного оборудования и его диагностика на основе метода анализа тока статора приводного электродвигателя. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, 2018, 2(126), 155–166 [Semykina I. Yu., Kipervasser M.V., Gerasimuk A.V. Mathematical modeling of pump and compressor equipment malfunctions and its diagnostics based on the method of analyzing the stator current of a drive electric motor, *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2018, 2(126), 155–166 (In Russian)].

[6] Филюшов Ю. П. *Многокритериальная оптимизация работы электропривода переменного тока*, дисс. ... канд. техн. наук. Новосибирск: НГТУ, 2007, 241 [Filyushov Yu. P. *Multicriteria optimization of AC electric drive operation*, diss. ... cand. of tech. Sci. Novosibirsk: NSTU, 2007, 241 (in Russian)].

[7] Попов Д. И. *Научные основы создания энергоэффективных методов и средств испытаний электрических машин*. Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2019. 175 [Popov D. I. *Scientific foundations of the creation of energy-efficient methods and means of testing electric machines*. Omsk: Omsk State Transport University, 2019. 175 (in Russian)].

[8] Харламов В. В., Попов Д. И. Разработка и исследование способа снижения потерь в схеме испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки. *Динамика систем, механизмов и машин*, 2019, 7(2), 79–84 [Kharlamov V. V., Popov D. I. Development and research of a method for reducing losses in the asynchronous motor test scheme using the mutual load method, *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*, 2019, 7(2), 79–84 (in Russian)]

[9] Фираго Б. И., Павлячик Л. Б. *Регулируемые электроприводы переменного тока*. Минск: Техноперспектива, 2006, 363 [Firago B. I., Pavlyachik L. B. *Adjustable AC electric drives*. Minsk: Technoprospectiva, 2006, 363 (in Russian)].

[10] 2ЭС10.00.000.000 РЭ Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС10 с асинхронными тяговыми электродвигателями, Руководство по эксплуатации, Часть 1, Описание и работа. Основные параметры и характеристики электровоза. Электрические схемы. Электрические машины [Электронный ресурс]. URL: <https://rcit.su/techinfoW11.html#tiW11-9> [дата обращения 18. 05. 2025] [2ES 10.00.000.000 RE DC electric freight locomotive 2ES 10 with asynchronous traction electric motors, Operation manual, Part 1, Description and operation. The main parameters and characteristics of an electric locomotive. Electrical circuits. Electric machines [Electronic resource]. URL: <https://rcit.su/techinfoW11.html#tiW11-9> [accessed 18. 05. 2025] (in Russian)].

EDN: VZLEKO

УДК 620.9

## Estimation of the Solar Energy Potential of Kamchatka on the Example of Petropavlovsk-Kamchatsky

**Kirill A. Pavlov\***

*Research Geotechnological Center*

*Far Eastern Branch*

*of Russian Academy of Sciences*

*Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation*

Received 04.10.2025, received in revised form 11.11.2025, accepted 14.11.2025

**Abstract.** This paper presents the solar energy potential estimation for power supplying decentralized consumers in Kamchatka on the example of Petropavlovsk-Kamchatsky. Monthly global radiation for 2017 was used as the input data. An analysis was performed of the monthly global radiation dependence on the sunshine duration. Using an empirical model considering the midday solar altitude and sunshine duration, monthly summary energy for 2017 were estimated. Calculations revealed a discrepancy between the estimated and actual data within 30 %, both upward and downward. Annual sums of energy are projected with high reliability. The annual solar energy potential, estimated for two settlements in Kamchatka, is approximately 1,100 kW·h/m<sup>2</sup>. The period from March to September is favorable for the operation of photovoltaic modules. It has been established that to obtain more reliable global solar radiation data in Kamchatka, it is necessary to develop empirical models that considering additional climatic data, such as cloudiness, humidity, and temperature. Calibrating of the empirical models requires high-resolution actinometric data (at least 1 hour).

**Keywords:** Global solar radiation, empirical model, sunshine duration, midday solar altitude, photovoltaic module.

**Acknowledgements.** The article was written at the expense of a grant from the Russian Science Foundation, Agreement № 2024–518–09 and Kamchatka region, Agreement № 30–2025–005943 (<https://rscf.ru/project/25–29–20263/>).

Citation: Pavlov K. A. Estimation of the Solar Energy Potential of Kamchatka on the Example of Petropavlovsk-Kamchatsky. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(8), 1072–1080. EDN: VZLEKO



© 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: 9pavkir9@gmail.com

## Оценка гелиоэнергетического потенциала Камчатского края на примере г. Петропавловска-Камчатского

К. А. Павлов

*Научно-исследовательский геотехнологический центр  
Дальневосточного отделения Российской академии наук  
Российская Федерация, Петропавловск-Камчатский*

**Аннотация.** В статье приводится оценка потенциала энергии солнечной радиации для возможности электроснабжения децентрализованных потребителей Камчатского края на примере г. Петропавловска-Камчатского. В качестве исходных данных приняты месячные суммы суммарной радиации за 2017 г. Выполнен анализ зависимости месячных сумм суммарной радиации от продолжительности солнечного сияния. На основе принятой эмпирической модели, учитывающей полуденную высоту солнца и продолжительность солнечного сияния, рассчитаны месячные суммы за 2017 г. Проведенные расчеты установили расхождение расчетных данных относительно фактических в пределах 30 %, как в сторону завышения, так и занижения. Годовые суммы прогнозируются с высокой долей надежности. Годовой гелиоэнергетический потенциал, оцененный по двум населенным пунктам Камчатского края, составил около 1100 кВт·ч/м<sup>2</sup>. Благоприятным для функционирования фотоэлектрических модулей является период с марта по сентябрь. Установлено, что для получения более надежных данных о приходе суммарной солнечной радиации в условиях Камчатского края необходима разработка эмпирических моделей, учитывающих дополнительные климатические данные, такие как облачность, влажность, температура. Для калибровки данных эмпирических моделей требуются актинометрические данные высокого временного разрешения (не менее 1 часа).

**Ключевые слова:** суммарная солнечная радиация, эмпирическая модель, продолжительность солнечного сияния, полуденная высота солнца, фотоэлектрический модуль.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25–29–20263 и Камчатского края № 30–2025–005943 (<https://rscf.ru/project/25–29–20263/>).

Цитирование: Павлов К. А. Оценка гелиоэнергетического потенциала Камчатского края на примере г. Петропавловска-Камчатского / К. А. Павлов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(8). С. 1072–1080. EDN: VZLEKO

### Введение

Постепенное истощение ископаемых видов энергетических ресурсов, значительное увеличение энергопотребления, а также увеличение выбросов парниковых газов в атмосферу приводят к необходимости повышения доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в общем энергобалансе. Особенно актуальной данная задача является для регионов с изолированной энергосистемой. Камчатский край, являясь таким регионом, уже в течение длительного времени является лидером по использованию ВИЭ в России. В настоящее время более четверти производимой в регионе электроэнергии обеспечивается за счет возобновляемых ресурсов, в основном посредством геотермальных, а в перспективе к 2030 г. планируется увеличение доли до 50 %.

Одним из активно развивающихся направлений в области ВИЭ в мире последние два десятилетия является солнечная энергетика. Экологичность и неисчерпаемость данного природного энергоресурса делают его весьма привлекательным и перспективным, что подтверждается экспоненциальным ростом установленной мощности солнечных электростанций за указанный

период по данным Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (англ. International Renewable Energy Agency, IRENA).

Несмотря на высокую долю ВИЭ, гелиоэнергетика в настоящее время не получила особого развития в Камчатском крае. Между тем, по данным карты инсоляции для регионов России [1], Камчатский край является среднепотенциальным регионом и уже имеется положительный опыт использования гелиоэнергетики для децентрализованного электроснабжения потребителей. Так, в 2019 г. по техническому проекту Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Научно-исследовательского геотехнологического центра» Дальневосточного отделения Российской академии наук (НИГТЦ ДВО РАН), основанного в том числе на данных инструментальных измерений плотности суммарной солнечной радиации [2, 3], и данным математического моделирования гибридной дизель-солнечной электростанции [4], в с. Долиновка Камчатского края компанией «Русгидро» была построена первая промышленная солнечная электростанция (СЭС) в регионе. Установленная мощность СЭС 107,2 кВт позволяет частично замещать генерируемую дизельной электростанцией энергию и, таким образом, сокращать расход дизельного топлива на 67 тонн в год, существенно снижая негативное воздействие на окружающую среду.

Ключевым входным параметром для СЭС является плотность суммарной солнечной радиации. Данный параметр весьма чувствителен к климатическим факторам, таким как облачность, антропогенная загрязненность воздуха твердыми частицами (пылью) и аэрозолями, содержание водяного пара и озона в воздухе. Следовательно, знание точных локальных значений суммарной солнечной радиации за годовой цикл является ключевым параметром при проектировании генерируемых энергосистем на основе СЭС. Получение точных значений суммарной солнечной радиации возможно только с помощью инструментальных измерений дорогостоящими приборами, например пиранометрами. Данные приборы требуют регулярной поверки и технического обслуживания, что делает задачу получения данных плотности суммарной радиации весьма дорогостоящей и трудоемкой.

Территория Камчатского края занимает площадь, равную 464275 км<sup>2</sup>. На данной территории располагается всего два актинометрических пункта Федерального государственного бюджетного учреждения «Камчатское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» («Камчатское УГМС»). Наиболее близко расположенный пункт (в 6 км) к административному центру края – метеостанция в п. Пионерский. Второй располагается севернее в 600 км в п. Ключи. Всего гидрометеорологическая сеть «Камчатского УГМС» насчитывает 37 станций и 87 постов, распределенных по всей территории края.

В настоящее время альтернативными способами получения наиболее достоверных данных о приходе суммарной солнечной радиации на земную поверхность могут являться эмпирические модели, модели на базе искусственного интеллекта, модели на основе спутниковых данных, модели переноса излучения. Наиболее часто используемыми из перечисленных являются эмпирические модели, благодаря общедоступности и распространенности входных климатических данных (температура и влажность воздуха, продолжительность солнечного сияния, облачность и др.), а также отсутствию необходимости использования значительных вычислительных мощностей для расчетов.

В работах [5, 6] авторами установлено, что модели, основанные на данных продолжительности солнечного сияния, дают наиболее достоверные оценки значений суммарной радиации.

Повышение надежности расчетных данных достигается путем калибровки эмпирических моделей по имеющимся локальным данным инструментальных измерений суммарной солнечной радиации.

Исходя из вышесказанного, оценка и калибровка имеющихся эмпирических моделей, а также разработка новых моделей являются весьма актуальной задачей, решение которой будет способствовать дальнейшему развитию солнечной энергетики и повышению доли ВИЭ в энергобалансе Камчатского края.

В данной работе на основе общедоступных актинометрических данных выполнена оценка гелиоэнергетического потенциала в условиях г. Петропавловска-Камчатского. Намечены перспективы дальнейших исследований в этом направлении с целью повышения надежности расчетных данных суммарной радиации по всей площади Камчатского края и выявления наиболее перспективных территорий.

### Методология исследования

Для достоверной оценки гелиоэнергетического потенциала необходимо использовать комплекс доступных актинометрических данных для рассматриваемой территории.

Для расчета потенциала гелиоэнергетического ресурса в условиях г. Петропавловска-Камчатского использованы данные «Камчатского УГМС» по месячным суммам суммарной радиации, поступающей на горизонтальную плоскость, и по продолжительности солнечного сияния за полный годовой цикл 2017 г. Указанные данные измерены на метеостанции в п. Пионерский, расположенной на 53° с.ш., аналогично г. Петропавловску-Камчатскому. Кроме того, использованы данные плотности суммарной радиации [2], полученные в с. Долиновка на 55° с.ш.

Для получения расчетных значений месячных сумм суммарной радиации, приходящей на горизонтальную плоскость, использовалась эмпирическая модель, учитывающая продолжительность солнечного сияния и полуденную высоту солнца [7]:

$$\sum Q_{\text{мес}} = 0,0049 \cdot SS^{1,31} + 10,5 \cdot (\sin h_n)^{2,1}, \quad (1)$$

где  $\sum Q_{\text{мес}}$  – месячная сумма суммарной радиации, ккал/см<sup>2</sup>;  $SS$  – продолжительность солнечного сияния за месяц, ч;  $h_n$  – полуденная высота солнца в градусах, рассчитанная по формуле:

$$h_n = 90 - \lambda \mp \delta, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – географическая широта места, градусы;  $\delta$  – склонение солнца, определенное на середину каждого месяца для принятой широты, градусы.

Полученные по формуле (1) расчетные данные месячных сумм суммарной радиации за 2017 г. сравнивались с фактическими данными за аналогичный период, определялись средняя абсолютная ошибка в процентах и среднеквадратическое отклонение.

Для проверки надежности модели (1) дополнительно проводились расчеты месячных сумм суммарной радиации в условиях с. Долиновка.

### Результаты исследования и их обсуждение

Камчатский край является регионом Крайнего Севера, имеет средний уровень солнечного воздействия и непродолжительное солнечное сияние [8]. Значительная облачность

существенно уменьшает продолжительность солнечного сияния, в результате на всей территории фактическое число часов солнечного сияния не превышает 43 % от возможного. По данным «Камчатского УГМС», наименьшее число часов солнечного сияния отмечается на Командорских островах (менее 950 часов) и юге края (менее 1000 часов), что составляет 21–22 % от возможного. Наибольшая продолжительность солнечного сияния наблюдается в долинах рек южной половины полуострова и в Петропавловске-Камчатском (1662–1936 часов). Число дней без солнца довольно значительно и в среднем составляет 100–120. Таким образом, наблюдается неравномерность в приходе солнечной радиации на территории Камчатского края.

Для оценки гелиоэнергетического потенциала в районе г. Петропавловска-Камчатского в качестве исходных данных приняты значения месячных сумм суммарной радиации (для горизонтальной поверхности) и продолжительности солнечного сияния за годовой цикл 2017 г. (рис. 1). На рис. 2 показана корреляция указанных параметров, коэффициент корреляции  $R^2$  составляет 0,82. Из рис. 1 видно, что с марта по август месячные суммы суммарной радиации существенно зависят от продолжительности солнечного сияния. В январе и феврале, а также с сентября по декабрь темп снижения количества суммарной радиации более интенсивный по сравнению со снижением продолжительности солнечного сияния. Это объясняется малой полуденной высотой солнца в указанные периоды (табл. 1) и, соответственно, малым углом по отношению к приемной горизонтальной поверхности. Наибольшее количество радиации (более 500 МДж/м<sup>2</sup>) поступает с мая по июль, с максимальным значением (около 650 МДж/м<sup>2</sup>) в июне. В табл. 1 приведена рассчитанная по формуле (2) на середину каждого месяца полуденная высота солнца для 53° с.ш. Из представленных в табл. 1 данных можно сделать вывод,

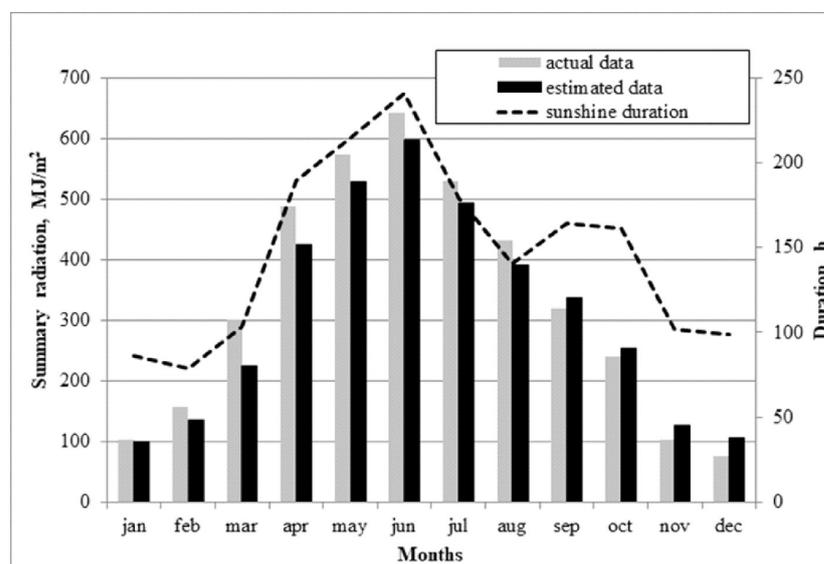


Рис. 1. Среднемесячные фактические и расчетные суммы суммарной радиации за 2017 г. в районе г. Петропавловска-Камчатского

Fig. 1. Monthly average actual and calculated sums of global radiation for 2017 in Petropavlovsk-Kamchatsky vicinity

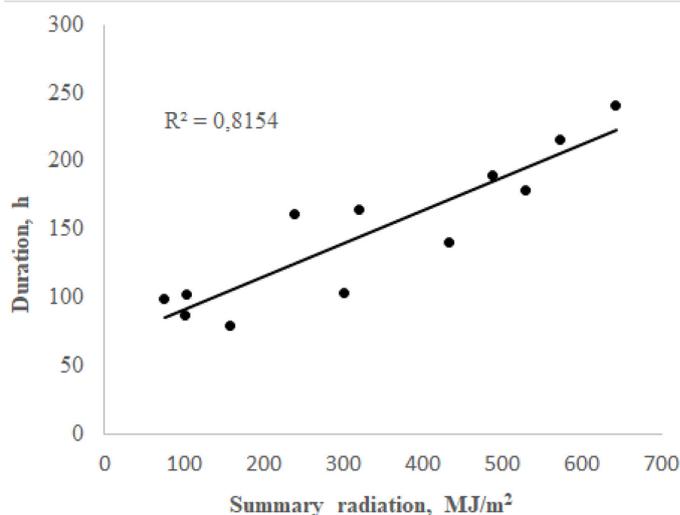


Рис. 2. Линейная корреляция значений суммарной радиации и продолжительности солнечного сияния в районе г. Петропавловска-Камчатского в 2017 г.

Fig. 2. Linear correlation between the values of global radiation and the sunshine duration in Petropavlovsk-Kamchatsky vicinity in 2017

Таблица 1. Полуденная высота солнца для 53°с.ш.

Table 1. The midday solar altitude for 53°N

	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Угол, градусы	16	25	35	46,8	55,9	60,3	58	51	40	28,5	18,5	13,8

что в зимние месяцы для повышения эффективности фотоэлектрических модулей необходимо изменение угла их наклона по отношению к горизонту.

Для получения расчетных значений месячных сумм суммарной радиации использовалась формула (1). Для оценки надежности расчетов по формуле (1) выполнено сравнение фактических и расчетных среднемесячных значений сумм суммарной радиации за 2017 г. в районе г. Петропавловска-Камчатского, сравнение представлено в табл. 2 и на рис. 1. Из сравнения данных видно, что расчетные данные показывают занижение месячных сумм суммарной радиации в период с января по август от 2 до 25 %. С сентября по декабрь происходит превышение фактических данных в диапазоне 5–30 %. Рассчитанная средняя абсолютная ошибка в процентах составляет 13 %, а среднеквадратическое отклонение составляет около 40 МДж/м<sup>2</sup>. В целом расчетные данные занижают годовую сумму суммарной радиации на 240 МДж, что составляет 6 %.

Дополнительно надежность принятой эмпирической модели (1) была оценена по фактическим данным суммарной радиации в условиях с. Долиновка Камчатского края, измеренным в 2017 г. [2]. В табл. 3 приведено сравнение расчетных и фактических данных. В целом из сравнения наблюдается аналогичное расхождение данных, как и в случае расчетов для

Таблица 2. Сравнение среднемесячных фактических и расчетных сумм суммарной радиации за 2017 г. в районе г. Петропавловска-Камчатского

Table 2. Comparison of monthly average actual and calculated amounts of global radiation for 2017 in Petropavlovsk-Kamchatsky vicinity

Данные	Суммы по месяцам						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
фактические	101,9	157,3	301,4	487,1	572,7	642,9	528,9
расчетные	99,9	134,6	225,7	423,6	529,1	597,8	494,2
Данные	Суммы по месяцам					Сумма за год	
	VIII	IX	X	XI	XII		
фактические	432,3	319,4	239,8	103,1	75,6	3962,57	
расчетные	391,9	337,7	253,2	127,1	106,2	3721,0	

Табл. 3. Сравнение среднемесячных фактических и расчетных сумм суммарной радиации за 2017 г. в с. Долиновка Камчатского края

Table 3. Comparison of monthly average actual and calculated amounts of global radiation for 2017 in village Dolinovka

Данные	Суммы по месяцам						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
фактические	93,7	136,8	299,5	457,1	512,3	623,8	607,9
расчетные	41,3	156,6	297,7	461,4	571,4	562,0	532,4
Данные	Суммы по месяцам					Суммы за год	
	VIII	IX	X	XI	XII		
фактические	522,3	341,9	199,2	73,7	52,2	3920	
расчетные	502,1	380,6	233,5	114,0	31,4	3885	

г. Петропавловска-Камчатского. Рассчитанная средняя абсолютная ошибка в процентах составляет 19 %, а среднеквадратическое отклонение – около 42 МДж/м<sup>2</sup>. По годовой сумме суммарной радиации расчетные данные занижают значение на 35 МДж/м<sup>2</sup>, что составляет 1 %.

По результатам полученного годового значения суммарной радиации вблизи г. Петропавловска-Камчатского можно приблизительно оценить гелиоэнергетический потенциал. При значении, равном 3960 МДж/м<sup>2</sup>, или 1100 кВт·ч/м<sup>2</sup>, а также номинальной эффективности фотоэлектрических модулей 19 % возможна выработка за год около 200 кВт·ч с одного м<sup>2</sup>. Необходимо отметить, что все приведенные значения гелиоэнергетического потенциала рассчитаны для горизонтально ориентированной поверхности. Увеличение количества генерируемой фотоэлектрическими модулями энергии возможно путем ориентирования приемной поверхности перпендикулярно солнечным лучам. Предварительные расчеты, выполненные в [8], показали возможность увеличения гелиоэнергетического потенциала на 16 % при подборе оптимального угла наклона приемной поверхности и его корректировке в течение года.

## Выводы

По результатам проведенного исследования были получены следующие выводы. Установлено, что принятая для оценки суммарной радиации эмпирическая модель, основанная на продолжительности солнечного сияния, не позволяет прогнозировать с достаточной точностью месячные суммы суммарной радиации. Расхождение расчетных значений относительно фактических данных возможно в пределах 30 %, как в сторону завышения, так и занижения. Годовые суммы прогнозируются с высокой долей надежности. Таким образом, для более детализированной оценки потенциальных гелиоэнергетических ресурсов необходимо проведение дополнительных исследований, уточняющих микроклиматические условия (облачность, влажность, температура и др.) отдельных территорий, с целью определения их перспективности в данном вопросе. В целом годовой гелиоэнергетический потенциал, оцененный по двум населенным пунктам Камчатского края, составляет около 1100 кВт·ч/м<sup>2</sup>. При этом благоприятным для функционирования СЭС является период с марта по сентябрь. Для уточнения работы режима СЭС необходимо получение актинометрических данных высокого временного разрешения (не менее 1 часа).

С июля 2025 г. в НИГТЦ ДВО РАН ведется измерение плотности суммарной солнечной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность, с временным шагом 1 минута пиранометром Kipp&Zonen CMP-6. Полученные за годовой цикл высокоточные инструментальные данные позволят максимально достоверно моделировать работу СЭС в условиях г. Петропавловска-Камчатского, оценивать объем генерируемой энергии, устанавливать оптимальную компоновку СЭС в случае ее гибридного исполнения. Кроме того, полученные данные о плотности суммарной радиации позволят разработать наиболее надежные эмпирические модели для прогнозирования поступления суммарной радиации на обширной территории Камчатского края, для которых имеются различные повсеместно регистрируемые климатические данные. Поставленные задачи будут являться направлением для дальнейших исследований.

## Список литературы / References

- [1] Карты инсоляции для регионов России [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.realsolar.ru> – Заглавие с экрана. [Insolation's maps for regions of Russia [Electronic resource] – Access: <http://www.realsolar.ru>]
- [2] Пашкевич Р.И., Павлов К.А., Давлетбаев Р.Г. Исследования плотности солнечного излучения в районе с. Долиновка Камчатского края, *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, 2017, S 35, 204–208 [Pashkevich R. I., Pavlov K. A., Davletbaev R. G. Research of solar insolation density in Dolinovka of Kamchatsky region, *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2017, S 35, 204–208 (in Russian)]
- [3] Пашкевич Р.И., Павлов К.А. Оценка эффективности использования солнечной энергии для электроснабжения автономных потребителей Камчатского края на примере с. Долиновка, *Электрические станции*, 2019, 8(1057), 51–55 [Pashkevich R. I., Pavlov K. A. An efficiency assessment of solar irradiation energy utilization for the power supply of the autonomous consumers of the Kamchatka region on the example of the village Dolinovka, *Electrical stations*, 2019, 8(1057), 51–55 (in Russian)]
- [4] Pashkevich R. I., Pavlov K. A. Mathematical modeling of a combined diesel-solar power plant for decentralized power supply to consumers, *Power Technology and Engineering*, 2020, 54(1), 106–110

[5] Chukwujindu N. S. A comprehensive review of empirical models for estimating global solar radiation in Africa, *Renew Sustain Energy Rev*, 2017, 78, 955–995

[6] Zhang J., Zhao L., Deng S., Xu W., Zhang Y. A critical review of the models used to estimate solar radiation, *Renew Sustain Energy Rev*, 2017, 70, 314–329

[7] Сивков С. И. *Методы расчета характеристик солнечной радиации*. Л., Гидрометеоиздат, 1968. 323 [Sivkov S. I. *Methods of solar irradiation characteristics calculation*, Leningrad, Hydrometeoizdat, 1968, 323 (in Russian)]

[8] Кобышева Н. В., Акентьева Е. М., Ильина О. Б. и др. Энциклопедия климатических ресурсов Российской Федерации. СПб., Гидрометеоиздат, 2005, 319 [Kobysheva N. V., Akentyeva E. M., Pyina O. B., i dr. *Encyclopedia of climate resources*, Saint Petersburg, Hydrometeoizdat, 2005, 319 (in Russian)]

[9] Daus Y. V., Pavlov K. A., Yudaev I. V., Dyachenko V. V. Increasing solar radiation flux on the surface of flat-plate solar power plants in Kamchatka Krai conditions, *Applied Solar Energy*, 2019, 55(2), 101–105

EDN: VFQADG

УДК 623.46

## The Algorithm of Trajectory Control of an Unmanned Aerial Vehicle and Its Radar Antenna when Forming a Radar Image a Land-Based Facility

Sergey A. Gorbunov <sup>a\*</sup>,  
Pavel N. Khatuntsev<sup>a</sup>, Alexander A. Kuchin<sup>a</sup>,  
I. Khasan<sup>a</sup>, Vadim A. Nenashev<sup>b</sup>,  
Kseniya V. Lagoshina<sup>b</sup> and Igor V. Lyutikov<sup>c</sup>

<sup>a</sup>*Military Academy of Aero-Space Defense  
named after the Marshal of Soviet Union G. K. Zhukov  
Tver, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Saint Petersburg State University  
Aerospace Instrumentation (GUAP)  
Saint Petersburg, Russian Federation*

<sup>c</sup>*Siberian Federal University  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 03.06.2025, received in revised form 25.10.2025, accepted 19.11.2025

**Abstract.** In the article, based on the mathematical apparatus of the statistical theory of optimal control, the optimal method and algorithm for trajectory control of an unmanned aerial vehicle carrier of a small airborne radar station in the formation of radar images – video frames of ground objects is synthesized. The accuracy of the formation of high-resolution radar video frames obtained by radar synthesis of the antenna aperture depends on the trajectory instabilities that occur during the flight of an unmanned aerial vehicle. This determines the need to develop algorithms for trajectory control of carriers of small-sized airborne radar stations and their antennas, taking into account the peculiarities of video frame formation over the time interval of antenna aperture synthesis. The formation of the required flight path with the antenna orientation based on the algorithm developed in the article will make it possible to ensure more efficient operation of small-sized airborne radar stations placed on unmanned aerial vehicles during the flight mission.

**Keywords:** Radar, unmanned aerial vehicle, trajectory control algorithms, formation of radar frames, radar image, radar synthesis of antenna aperture.

---

© 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: foxstavr@mail.ru

**Acknowledgements.** The study was funded by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 24–79–10259).

Citation: Gorbunov S. A., Khatuntsev P. N., Kuchin A. A., Khasan I., Nenashev V. A., Lagoshina K. V., Lyutikov I. V. The Algorithm of Trajectory Control of an Unmanned Aerial Vehicle and Its Radar Antenna when Forming a Radar Image a Land-Based Facility. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(8), 1081–1097. EDN: VFQADG



## **Алгоритм траекторного управления беспилотным летательным аппаратом и антенной его радиолокационной станции при формировании радиолокационного изображения наземного объекта**

**С. А. Горбунов<sup>а</sup>, П. Н. Хатунцев<sup>а</sup>,  
А. А. Кучин<sup>а</sup>, И. Хасан<sup>а</sup>,**

**В. А. Ненасhev<sup>б</sup>, К. В. Лагошина<sup>б</sup>, И. В. Лютиков<sup>в</sup>**

*<sup>а</sup>Военная академия воздушно-космической обороны  
им. Маршала Советского Союза Г. К. Жукова  
Российская Федерация, Тверь*

*<sup>б</sup>Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения (ГУАП)  
Российская Федерация, Санкт-Петербург*

*<sup>в</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск*

**Аннотация.** В статье на основе математического аппарата статистической теории оптимального управления синтезированы оптимальный по минимуму локального функционала качества метод и алгоритм траекторного управления беспилотным летательным аппаратом – носителем малогабаритной бортовой радиолокационной станции при формировании радиолокационных изображений – видеокадров наземных объектов. Точность формирования радиолокационных видеокадров высокого разрешения, получаемых методом радиолокационного синтезирования апертуры антенны, зависит от траекторных нестабильностей, возникающих во время полета беспилотного летательного аппарата. Это предопределяет необходимость разработки алгоритмов траекторного управления носителями малогабаритных бортовых радиолокационных станций и их антеннами, учитывающих особенности формирования видеокадров на интервале времени синтезирования апертуры антенны. Формирование требуемой траектории полета с ориентацией антенны на основе разработанного в статье алгоритма позволит в процессе выполнения полетного задания обеспечить более эффективное функционирование малогабаритных бортовых радиолокационных станций, размещаемых на беспилотных летательных аппаратах.

**Ключевые слова:** радиолокация, беспилотный летательный аппарат, алгоритмы траекторного управления, формирование радиолокационных кадров, радиолокационное изображение, радиолокационное синтезирование апертуры антенны.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24–79–10259).

Цитирование: Горбунов С. А. Алгоритм траекторного управления беспилотным летательным аппаратом и антенной его радиолокационной станции при формировании радиолокационного изображения наземного объекта / С. А. Горбунов, П. Н. Хатунцев, А. А. Кучин, И. Хасан, В. А. Ненашев, К. В. Лагошина, И. В. Лютиков // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(8). С. 1081–1097. EDN: VFQADG

### Введение

Одним из актуальных направлений развития современной радиолокации в целях формирования высокоточных радиолокационных изображений наземных объектов на основе комплексной и интеллектуальной обработки потоков радиолокационных кадров является применение метода синтеза апертуры антенны. Размещение радиолокационных станций (РЛС), реализующих такой метод на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА), рационально с точки зрения экономических и эксплуатационных требований, однако накладывает ряд ограничений на условия их применения. Так, одним из наиболее существенных ограничений является нежелательное отклонение от номинальной траектории полета БПЛА, которое может привести к расфокусировке, геометрическим искажениям или фазовым ошибкам при формировании отдельных радиолокационных кадров [1]. Режим телескопического наблюдения позволяет устранить в некоторой степени требования к точности траектории полета БПЛА, однако требует отдельного управления антенной РЛС, размещаемой на борту летательного аппарата.

Отсюда возникает необходимость разработки обобщенного алгоритма управления с точки зрения построения траектории беспилотным летательным аппаратом и углом отклонения строительной оси антенны его бортовой РЛС, который позволит обеспечить требуемую траекторию полета БПЛА, наиболее благоприятную для наблюдения за наземными целями (НЦ), обеспечивающую комплексную и интеллектуальную обработку потоков радиолокационных кадров требуемого качества, в том числе получаемую с пространственно-распределенных РЛС, размещенных на двух и более БПЛА, функционирующих в группе.

**Цель статьи** – разработать алгоритм траекторного управления БПЛА и углом отклонения строительной оси антенны его малогабаритной бортовой РЛС, позволяющий обеспечить устойчивое наблюдение НЦ в интересах формирования радиолокационных видеокадров требуемого разрешения, пригодных для их комплексной и интеллектуальной потоковой обработки требуемого качества.

#### *Рамки исследований*

Исследования проводятся при следующих ограничениях.

1. Наземная цель, подвижная или неподвижная.
2. Рассматривается БПЛА самолетного типа, выполняющий полет с постоянной скоростью.
3. Такие параметры, как угол поворота антенны бортовой РЛС и высота полета БПЛА, не должны превышать значений, обусловленных допустимыми перегрузками БПЛА.
4. Радиус искривления траектории полета БПЛА обеспечивает его поперечное ускорение не более  $5g$ .

5. Время окончания наблюдения НЦ соответствует моменту, когда дальнейшее управление приведет к столкновению БПЛА с НЦ либо земной поверхностью.

6. При синтезе алгоритма управления принято допущение, что каналы управления в вертикальной и горизонтальной плоскости работают независимо [2, 3], и так как БПЛА относительно наземной цели движется горизонтально, ограничен только в вертикальной плоскости, то и при решении задачи синтеза целесообразно рассматривать только вертикальную плоскость.

#### *Постановка задачи синтеза алгоритма*

В общем случае задача синтеза алгоритма оптимального управления летательным аппаратом в рамках статистической теории оптимального управления в пространстве состояний формулируется следующим образом [2, 4]:

для системы с заданной частью

$$\dot{\mathbf{x}}_y(t) = \mathbf{F}_y(t)\mathbf{x}_y(t) + \mathbf{B}_y(t)\mathbf{u}(t) + \xi_x(t), \quad (1)$$

предназначенной для отработки процесса

$$\dot{\mathbf{x}}_T(t) = \mathbf{F}_T(t)\mathbf{x}_T(t) + \xi_T(t), \quad (2)$$

при наличии измерений

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{H}(t)\mathbf{x}(t) + \xi_H(t), \quad (3)$$

найти закон управления

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{B}_y^T\mathbf{Q}\left[\hat{\mathbf{x}}_T(t) - \hat{\mathbf{x}}_y(t)\right], \quad (4)$$

оптимальный по минимуму локального функционала качества

$$I = M_y \left\{ \left[ \mathbf{x}_T(t) - \mathbf{x}_y(t) \right]^T \mathbf{Q} \left[ \mathbf{x}_T(t) - \mathbf{x}_y(t) \right] + \int_0^t \mathbf{u}^T(t) \mathbf{K} \mathbf{u}(t) dt \right\}, \quad (5)$$

где  $\mathbf{F}_y(t)$  – динамическая матрица, учитывающая внутренние связи координат состояния процесса (1);  $\mathbf{x}_y(t)$  –  $n$ -мерный вектор управляемых фазовых координат;  $\mathbf{B}_y(t)$  – матрица эффективности управления;  $\mathbf{u}(t)$  –  $r$ -мерный вектор сигналов управления ( $r \leq n$ );  $\xi_x(t)$  –  $n$ -мерный вектор центрированных гауссовских возмущений процесса  $\mathbf{x}_y(t)$  с известной матрицей  $\mathbf{G}_y$  односторонних спектральных плотностей;  $\mathbf{F}_T(t)$  – динамическая матрица, учитывающая внутренние связи координат состояния процесса (2);  $\mathbf{x}_T(t)$  –  $n$ -мерный вектор требуемых фазовых координат;  $\xi_T(t)$  –  $n$ -мерный вектор центрированных гауссовских возмущений процесса  $\mathbf{x}_T(t)$  с известной матрицей  $\mathbf{G}_T$  односторонних спектральных плотностей;  $\mathbf{H}(t)$  – матрица связи обобщенного вектора состояния  $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_T^T & \mathbf{x}_y^T \end{bmatrix}^T$  с  $m$ -мерным вектором  $\mathbf{z}$  наблюдений (измерений) ( $m \leq 2n$ );  $\xi_H(t)$  –  $m$ -мерный вектор центрированных гауссовских шумов измерений с известной матрицей  $\mathbf{G}_H$  односторонних спектральных плотностей;  $\mathbf{K}$  – матрица штрафов за величину сигналов управления;  $\mathbf{Q}$  – матрица штрафов за точность управления  $[\hat{\mathbf{x}}_T(t) - \hat{\mathbf{x}}_y(t)]$ ;  $M_y$  – математическое ожидание при условии, что имеются результаты измерения хотя бы части фазовых координат  $\mathbf{x}_y$  и  $\mathbf{x}_T$ .

Для линейно-квадратично-гауссовской задачи синтеза, требованиями для которой являются линейность моделей, квадратичность функционалов и гауссовость шумов, условия упро-

шения синтеза оптимальной РЭСУ определяются фундаментальной теоремой разделения (статистической эквивалентности), заключающейся в следующем.

Для линейных моделей (1) и (3) в условиях гауссовских возмущений  $\xi_x$  и  $\xi_{in}$  при оптимизации системы по квадратичному функционалу качества (5) алгоритмы оценивания и алгоритмы управления можно синтезировать отдельно (независимо). При этом алгоритм функционирования статистического регулятора, учитывающего влияние возмущений  $\xi_x$  и  $\xi_{in}$ , будет аналогичен (статистически эквивалентен) алгоритму функционирования детерминированного регулятора, полученному для ситуации, когда  $\xi_x=0$  и  $\xi_{in}=0$ , при условии замены в последнем координат состояния  $\mathbf{x}$  и параметров системы  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{B}$ , и  $\mathbf{H}$  их оптимальными оценками  $\hat{\mathbf{x}}$ ,  $\hat{\mathbf{F}}$ ,  $\hat{\mathbf{B}}$ , и  $\hat{\mathbf{H}}$ . Наилучшим по критерию минимума среднеквадратической ошибки [2–4] приближением оценки  $\hat{\mathbf{x}}$  к случайному процессу  $\mathbf{x}$  является условное математическое ожидание

$$\hat{\mathbf{x}} = M\{\mathbf{x} | \mathbf{z}\}. \quad (6)$$

Оценивание вектора  $\mathbf{x}$  будет тем точнее, чем точнее сведения о параметрах используемых процессов и систем. В моделях (2) роль параметров играют коэффициенты матриц  $\mathbf{F}_t$ ,  $\mathbf{G}_t$ ,  $\mathbf{F}_y$ ,  $\mathbf{B}_y$ ,  $\mathbf{G}_y$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{G}_i$ . Для текущего оценивания параметров целесообразно использовать алгоритмы теории оптимальной идентификации, которые позволяют найти оценки, оптимальные по критерию минимума среднеквадратической ошибки

$$\hat{\mathbf{H}} = M\{\mathbf{H} | \mathbf{z}\}, \hat{\mathbf{F}} = M\{\mathbf{F} | \mathbf{z}\}, \hat{\mathbf{B}} = M\{\mathbf{B} | \mathbf{z}\}, \hat{\mathbf{G}} = M\{\mathbf{G} | \mathbf{z}\}, \quad (7)$$

используемые в алгоритмах фильтрации и вычисления сигналов управления.

Для использования (4) необходимо иметь модели состояния и измерений, которые должны обеспечивать решение следующих задач [2–4]:

- учет основных кинематических связей оптимизируемой системы;
- выполнение условий управляемости и наблюдаемости [2–4] при использовании стандартных рулевых органов и типовых измерителей;
- формирование на борту БПЛА значений требуемого поперечного ускорения  $j_r$ .

#### *Динамическая модель взаимного перемещения БПЛА и НЦ*

Динамика взаимного перемещения БПЛА относительно НЦ с учетом угла отклонения строительной оси антенны представлена на рис. 1, а также на рис. 2 изображено более подробно положение антенны относительно строительной оси БПЛА во время полета.

На рис. 1 и 2 также обозначено:

$D$  – расстояние между БПЛА и НЦ;  $V_{\text{бпЛА}}$  – текущая скорость БПЛА;  $V_{\text{нц}}$  – скорость перемещения НЦ;  $\omega$  – угловая скорость вращения линии визирования между БПЛА и НЦ;  $\varphi_{\text{бпЛА}}$  – текущее значение бортового пеленга НЦ с БПЛА;  $\varphi_{\text{тр}}$  – требуемое значение бортового пеленга НЦ с БПЛА;  $\alpha_A$  – угол отклонения строительной оси антенны;  $\alpha_{A \text{ тр}}$  – требуемый угол отклонения строительной оси антенны;  $\varepsilon$  – угол отклонения линии визирования;  $\psi_{\text{бпЛА}}$  – текущее значение курса полета БПЛА;  $(x_{\text{нц}}, y_{\text{нц}})$  – координаты НЦ;  $(x_{\text{ла}}, y_{\text{ла}})$  – координаты БПЛА.

Исходя из анализа требуемой траектории наведения БПЛА она может быть разбита на три этапа (рис. 3).

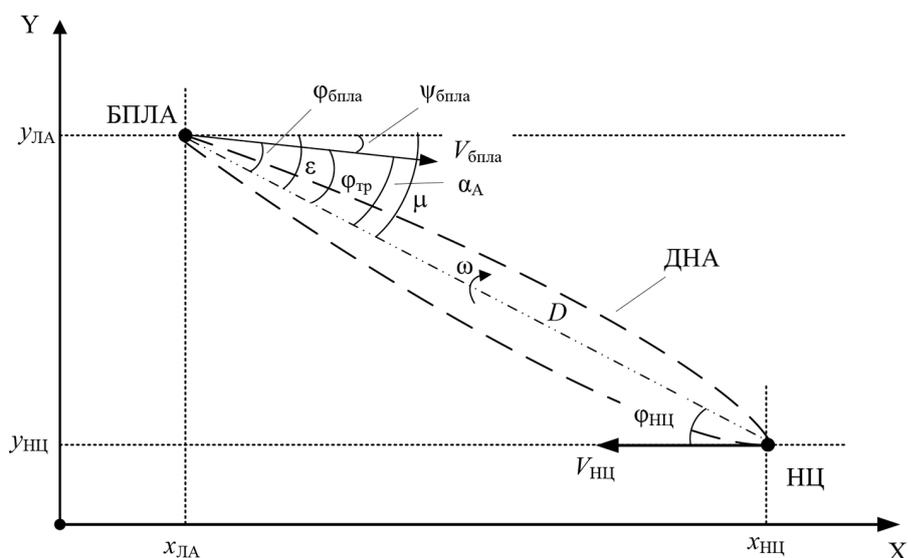


Рис. 1. Взаимное расположение БПЛА и НЦ (в вертикальной плоскости)

Fig. 1. The relative position of the UAV and the ground object (in the vertical plane)

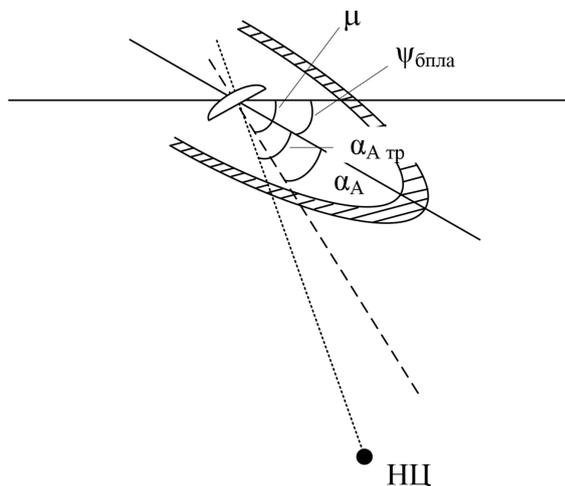


Рис. 2. Положение антенны относительно строительной оси БПЛА в процессе сопровождения НЦ

Fig. 2. The position of the antenna relative to the UAV's construction axis during ground object tracking

На первом этапе сопровождения управление осуществляется углом отклонения строительной оси антенны бортовой РЛС, траектория полета БПЛА не изменяется до тех пор (горизонтальный полет), пока угол отклонения строительной оси антенны  $\alpha_A$  не будет равен максимальному углу отклонения  $\alpha_{A \max}$ , а поперечное ускорение БПЛА  $j_{\text{БПЛА}}$  не превысит допустимого значения  $j_{\text{БПЛА доп}}$  (допустимое значение ускорения  $j_{\text{БПЛА доп}}$  рассчитывается при максимально возможном значении скорости БПЛА).

Максимальный потребный угол отклонения строительной оси антенны определяется формулой [5]

$$\alpha_{A \max} = \varphi_{\text{бпЛА т max}} - \Delta\alpha,$$

где  $\varphi_{\text{бпЛА т max}}$  – максимальное допустимое значение угла пеленга при сопровождении НЦ в бортовой РЛС БПЛА;  $\Delta\alpha$  – запас по углу поворота строительной оси антенны, необходимый для исключения потери НЦ при динамических бросках БПЛА на траектории, в том числе вызванных турбулентностью атмосферы.

На первом этапе алгоритм управления можно представить как  $\Delta_A = \alpha_{A \text{ тр}} - \alpha_A$ .

Для упрощения математических выкладок в дальнейшем собственная скорость НЦ при управлении отклонением строительной оси антенны бортовой РЛС не учитывается. Собственная скорость НЦ будет учитываться при управлении поперечным ускорением БПЛА.

Известно [6], что при значительных углах поворота строительной оси антенны необходимо учитывать ошибки обтекателя, которые обусловлены несовершенством его конструкции и проявляются в дополнительном непредсказуемом смещении равносигнального направления относительно линии визирования.

За счет электрических неоднородностей в обтекателе нулевое напряжение на выходе пеленгационного устройства угломера устанавливается при смещении строительной оси антенны бортовой РЛС БПЛА на угол  $\Delta\varphi = \pm k_{\text{об}}\alpha_A$  относительно направления строительной оси антенны на НЦ, где  $k_{\text{об}}$  – крутизна пеленгационной характеристики обтекателя.

На втором этапе, когда угол отклонения строительной оси антенны  $\alpha_A$  равен максимальному требуемому углу  $\alpha_{A \max}$ , либо дальность  $D$  до НЦ близка значению, на котором требуемое поперечное ускорение БПЛА  $j_{\text{бпЛА тр}}$  в дальнейшем превысит допустимые значения  $j_{\text{бпЛА доп}}$ , управление осуществляется перегрузкой при фиксированном, близком к максимальному требуемому значению угла отклонения строительной оси антенны ( $\alpha_{A \max}$ ), до момента, при котором значение курса ракеты будет соответствовать значению  $\psi_{\text{бпЛА}} = 90^\circ - \alpha_{A \max}$ , означающее вертикальное облучение НЦ (сверху вниз). Дальнейшее управление поперечным ускорением

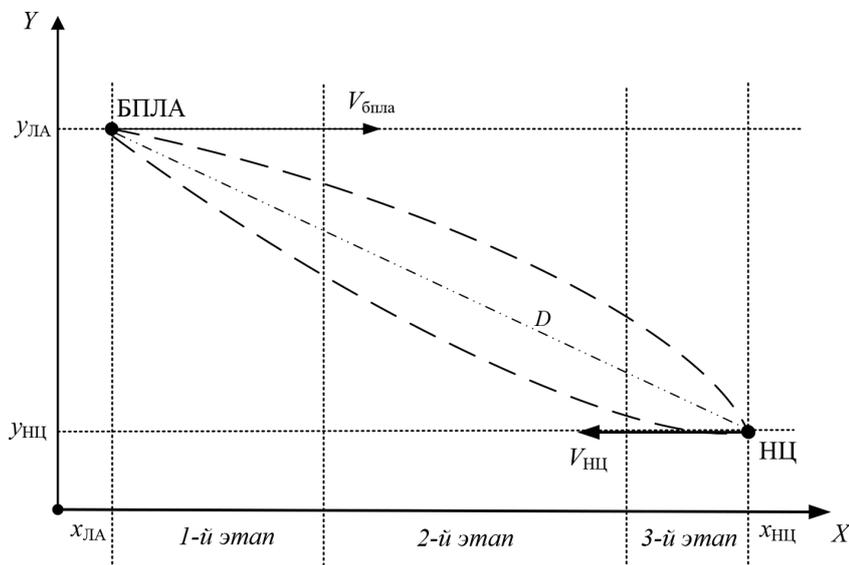


Рис. 3. Этапы сопровождения НЦ в бортовой РЛС БПЛА

Fig. 3. The stages of tracking a ground object in an on-board UAV radar station

при фиксированном максимальном угле отклонения строительной оси антенны приведет к неоправданному искривлению траектории полета УР, что, в свою очередь, скажется на увеличении дальности полета БПЛА и времени наблюдения НЦ.

На втором этапе алгоритм может быть представлен известными ранее алгоритмами, широко представленными в [2–4], например алгоритмом  $\Delta_j = j_t - j$ .

На третьем этапе наведения должно осуществляться управление углом отклонения строительной оси антенны и поперечным ускорением БПЛА одновременно, что требует решения задачи синтеза алгоритма совместного траекторного управления поперечным ускорением БПЛА и углом отклонения строительной оси антенны бортовой РЛС.

#### *Условия синтеза оптимального алгоритма*

При получении уравнений состояния предполагается, что выполняются следующие допущения:

- при самонаведении на борту БПЛА формируются значения требуемого поперечного ускорения;
- БПЛА и НЦ могут маневрировать с поперечными к линии визирования «БПЛА-НЦ» ускорениями  $j_{\text{бпла}}$  и  $j_{\text{нц}}$  соответственно, а ускоряться – с продольным к линии визирования «БПЛА-НЦ» ускорением  $j_{\text{прод нц}}$ .

Для линейных моделей (1) и (3) в условиях гауссовских возмущений  $\xi_x$  и  $\xi_n$  при оптимизации системы по квадратичному функционалу качества (5) алгоритмы оценивания фазовых координат вектора состояния и алгоритмы траекторного управления можно синтезировать отдельно (независимо) [2–4].

Рассмотрим более подробно динамику взаимного перемещения БПЛА и НЦ, представленную на рис. 1 с учетом рис. 2.

Введем угол

$$\mu = \varepsilon - \Phi_{\text{бпла}} + \alpha_A. \quad (8)$$

Если продифференцировать выражение (8), получим

$$\dot{\mu} = \dot{\varepsilon} - \dot{\Phi}_{\text{бпла}} + \dot{\alpha}_A,$$

или

$$\dot{\mu} = \omega - \dot{\Phi}_{\text{бпла}} + \dot{\alpha}_A,$$

где  $\omega = \dot{\varepsilon}$ .

Тогда представим угловую скорость ЛВ как

$$\omega = \dot{\mu} - \dot{\alpha}_A + \dot{\Phi}_{\text{бпла}}. \quad (9)$$

Тогда с учетом побочных явлений угломера, рассмотренных ранее, угловая скорость линии визирования будет иметь вид

$$\omega = \dot{\mu} - \dot{\alpha}_A + \dot{\Phi}_{\text{бпла}} \pm k_{\text{об}} \dot{\Psi}_{\text{бпла}}. \quad (10)$$

При управлении отклонением строительной оси антенны динамическая модель, описывающая данный процесс, будет иметь вид [3]

$$\begin{cases} \dot{\alpha}_A = \omega_A; & \alpha_A(0) = \alpha_{A0}; \\ \dot{\omega}_A = \frac{1}{T} \omega_A + \frac{b}{T} u_A + \xi_A; & \omega_A(0) = \omega_{A0}. \end{cases} \quad (11)$$

где  $b$  – коэффициент усиления привода поворота антенны;  $T$  – постоянная времени.

Проецируя скорости  $V_{\text{бпла}}$  и  $V_{\text{нц}}$  на линию визирования и нормаль к ней, получаем

$$\dot{D} = V_{\text{нц}} \cos \varphi_{\text{нц}} - V_{\text{бпла}} \cos \varphi_{\text{бпла}}, \quad (12)$$

$$D\omega = V_{\text{бпла}} \sin \varphi_{\text{бпла}} - V_{\text{нц}} \sin \varphi_{\text{нц}}. \quad (13)$$

Скорость полета БПЛА самолетного типа примерно в том же скоростном диапазоне, что и скорость подвижных наземных объектов – автомобилей, поездов, и т.п., следовательно, необходимо их учитывать.

Для упрощения выкладок примем допущение, что косинусы всех углов примерно равны единице, а синусы – своим аргументам.

Дифференцируя выражение (13) по времени при  $V_{\text{бпла}} = \text{const}$ , получаем

$$\dot{D}\omega + D\dot{\omega} = V_{\text{бпла}} \dot{\varphi}_{\text{бпла}} - \dot{V}_{\text{нц}} \varphi_{\text{нц}} - V_{\text{нц}} \dot{\varphi}_{\text{нц}} \quad (14)$$

или

$$D\dot{\omega} = V_{\text{бпла}} (\dot{\epsilon} - \dot{\psi}_{\text{бпла}}) - \dot{V}_{\text{нц}} \varphi_{\text{нц}} - V_{\text{нц}} (\dot{\epsilon} - \dot{\psi}_{\text{нц}}) - \dot{D}\omega.$$

Раскрывая скобки, и с учетом того, что  $\dot{\epsilon} = \omega$ ,  $V_{\text{бпла}} \dot{\psi}_{\text{бпла}} = j_{\text{бпла}}$ ,  $\dot{V}_{\text{нц}} \varphi_{\text{нц}} = j_{\text{прод нц}}$  и  $V_{\text{нц}} \dot{\psi}_{\text{нц}} = j_{\text{нц}}$  получим

$$\dot{\omega} = \frac{V_{\text{бпла}} - V_{\text{нц}} - \dot{D}}{D} \omega - \frac{1}{D} (j_{\text{бпла}} - j_{\text{нц}} + j_{\text{прод нц}}). \quad (15)$$

Так как  $V_{\text{нц}} - V_{\text{бпла}} = \dot{D}$ , а  $\omega = \dot{\mu} - \dot{\alpha}_A + \dot{\varphi}_{\text{бпла}} \pm k_{\text{об}} \dot{\psi}_{\text{бпла}}$ , тогда в конечном виде выражение (15) можно представить как

$$\dot{\omega} = -\frac{2\dot{D}}{D} (\dot{\mu} - \dot{\alpha}_A + \dot{\varphi}_{\text{бпла}} \pm k_{\text{об}} \dot{\psi}_{\text{бпла}}) - \frac{1}{D} (j_{\text{бпла}} - j_{\text{нц}} + j_{\text{прод нц}}). \quad (16)$$

Для определения изменения бортового пеленга НЦ с БПЛА в процессе наведения представим формулу (12) как

$$\varphi_{\text{бпла}} = \arcsin \left( \frac{D\omega + V_{\text{нц}} \sin \varphi_{\text{нц}}}{V_{\text{бпла}}} \right). \quad (17)$$

Дифференцируя (17) по времени при  $V_{\text{бпла}} = \text{const}$ , получаем

$$\dot{\varphi} = \omega + \frac{1}{D} (j_{\text{бпла}} - j_{\text{нц}} + j_{\text{прод нц}}) \quad (18)$$

или с учетом выражения (10)

$$\dot{\varphi} = (\dot{\mu} - \dot{\alpha}_A + \dot{\varphi}_{\text{бпла}} \pm k_{\text{об}} \dot{\psi}_{\text{бпла}}) + \frac{1}{D} (j_{\text{бпла}} - j_{\text{нц}} + j_{\text{прод нц}}). \quad (19)$$

Таким образом, на основании рис. 1 и выражений (16) и (19) динамическая модель, описывающая взаимное перемещение БПЛА и НЦ, будет иметь вид

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_{\text{бпЛА}} = (\dot{\mu} - \dot{\alpha}_A + \dot{\varphi}_{\text{бпЛА}} \pm k_{\text{об}} \dot{\psi}_{\text{бпЛА}}) + \frac{1}{D} (j_{\text{бпЛА}} - j_{\text{нц}} + j_{\text{прод нц}}) + \xi_{\varphi_{\text{бпЛА}}}; \\ \varphi_{\text{бпЛА}}(0) = \varphi_{\text{бпЛА}0}; \\ \dot{\omega} = -\frac{2\dot{D}}{D} (\dot{\mu} - \dot{\alpha}_A + \dot{\varphi}_{\text{бпЛА}} \pm k_{\text{об}} \dot{\psi}_{\text{бпЛА}}) - \frac{1}{D} (j_{\text{бпЛА}} - j_{\text{нц}} + j_{\text{прод нц}}) + \xi_{\omega}; \\ \omega(0) = \omega_0. \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} \dot{D} = -V_{\text{бпЛА нц}}; & D(0) = D_0; \\ \dot{V}_{\text{бпЛА нц}} = j_{\text{прод}}; & V_{\text{бпЛА нц}}(0) = V_{\text{бпЛА нц}0}; \\ \dot{j}_{\text{прод}} = -\alpha j_{\text{прод}} + \xi_{j_{\text{прод}}}; & j_{\text{прод}}(0) = j_{\text{прод}0}, \end{cases} \quad (21)$$

где  $\dot{D} = -V_{\text{бпЛА нц}}$  – скорость изменения расстояния между БПЛА и НЦ;  $\alpha$  – коэффициент, характеризующий маневренные свойства БПЛА.

Адекватность динамической модели (20), (21) проверялась путем сравнения с результатами созданных ранее и хорошо себя зарекомендовавших моделей, представленных в [2–4], неадекватность составила не более 11 %.

Условие наблюдаемости [2–4] системы (20), (21) измерениями выполняется, поскольку в каждой группе функционально связанных координат модели состояния измеряются как минимум нулевые производные.

Данная динамическая модель взаимного перемещения БПЛА и НЦ в процессе наведения показывает динамику изменения основных параметров во времени.

#### Синтез алгоритма

Для синтеза управления необходимо иметь модели состояния (1), (2) и функционал качества в виде (4) [2–4].

Исходя из того что параметрами управления являются угол отклонения строительной оси антенны бортовой РЛС и поперечное ускорение БПЛА, при синтезе оптимального алгоритма управления вектор управления будет иметь вид

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \Delta_A & 0 \\ 0 & \Delta_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{A \text{ тр}} - \alpha_A & 0 \\ 0 & j_{\text{бпЛА}} - j_{\text{нц}} + j_{\text{прод нц}} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Требуемыми параметрами для системы самонаведения БПЛА, учитывающими управление отклонением строительной оси антенны, угловой скоростью поворота антенны, ракурсом радиолокационного наблюдения в АРС ракеты отраженных от НЦ сигналов и угловой скоростью вращения линии визирования «БПЛА-НЦ» являются  $\alpha_{A \text{ тр}}$ ,  $\omega_{A \text{ тр}}$ ,  $\varphi_{\text{бпЛА тр}}$  и  $\omega_{\text{тр}}$  соответственно, т.е. вектор требуемых координат состояния  $\mathbf{x}_T$  будет иметь вид

$$\mathbf{x}_T = \begin{bmatrix} \alpha_{A \text{ тр}} \\ \omega_{A \text{ тр}} \\ \varphi_{\text{бпЛА тр}} - \varphi_A \\ \omega_{\text{тр}} - \omega_A \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Управляемыми параметрами для системы самонаведения БПЛА являются  $\alpha_A$ ,  $\omega_A$ ,  $\varphi_{\text{бпла}}$  и  $\omega$ , следовательно, вектор управляемых координат состояния  $\mathbf{x}_y$  будет следующим

$$\mathbf{x}_y = \begin{bmatrix} \alpha_A \\ \omega_A \\ \varphi_{\text{бпла}} \\ \omega \end{bmatrix}, \quad (24)$$

Так как параметрами управления являются угол отклонения строительной оси антенны  $\alpha_A$  и боковое ускорение БПЛА  $j_{\text{бпла}}$ , а управляемыми параметрами –  $\alpha_A$ ,  $\omega_A$ ,  $\varphi_{\text{бпла}}$  и  $\omega$ , то матрицу эффективности сигналов управления  $\mathbf{V}_y$  образуют коэффициенты при векторе управления  $\mathbf{u}$  в динамических моделях (11) и (20)

$$\mathbf{V}_y = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{b}{T} \\ \frac{1}{\dot{D}} \\ \frac{1}{D} \end{bmatrix}. \quad (25)$$

Матрицы штрафов за точность наведения  $\mathbf{Q}$  и величину сигналов управления  $\mathbf{K}$  в формуле (4) с учетом размерности матриц (22)–(25) имеют вид

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_{\alpha_A} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{\omega_A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{\varphi_{\text{бпла}}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{\omega} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{\alpha_A} & 0 \\ 0 & k_j \end{bmatrix}. \quad (26)$$

В результате функционал качества (5) принимает вид

$$I = M_y \left\{ \begin{aligned} & \left[ \begin{array}{cc} \alpha_A \text{ тр} - \alpha_A & \\ \omega_A \text{ тр} - \omega_A & \\ \varphi_{\text{бпла}} \text{ тр} - \alpha_A - \varphi_{\text{бпла}} & \\ \omega_{\text{тр}} - \omega_A - \omega & \end{array} \right]^T \left[ \begin{array}{cccc} q_{\alpha_A} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{\omega_A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{\varphi_{\text{бпла}}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{\omega} \end{array} \right] \left[ \begin{array}{cc} \alpha_A \text{ тр} - \alpha_A & \\ \omega_A \text{ тр} - \omega_A & \\ \varphi_{\text{бпла}} \text{ тр} - \alpha_A - \varphi_{\text{бпла}} & \\ \omega_{\text{тр}} - \omega_A - \omega & \end{array} \right] + \\ & + \int_0^t \left[ \begin{array}{cc} \alpha_A \text{ тр} - \alpha_A & 0 \\ 0 & j_{\text{бпла}} - j_{\text{нц}} + j_{\text{прод нц}} \end{array} \right]^T \left[ \begin{array}{cc} k_{\alpha_A} & 0 \\ 0 & k_j \end{array} \right] \left[ \begin{array}{cc} \alpha_A \text{ тр} - \alpha_A & 0 \\ 0 & j_{\text{бпла}} - j_{\text{нц}} + j_{\text{прод нц}} \end{array} \right] dt \end{aligned} \right\}. \quad (27)$$

Подставив выражения (22) – (25) в выражение (4), получим следующее соотношение

$$\left[ \begin{array}{cc} \alpha_A \text{ тр} - \alpha_A & 0 \\ 0 & j_{\text{бпла}} - j_{\text{нц}} + j_{\text{прод нц}} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{cc} k_{\alpha_A} & 0 \\ 0 & k_j \end{array} \right]^{-1} \left[ \begin{array}{c} 0 \\ \frac{b}{T} \\ \frac{1}{\dot{D}} \\ \frac{1}{D} \end{array} \right]^T \left[ \begin{array}{cccc} q_{\alpha_A} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{\omega_A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{\varphi_{\text{бпла}}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{\omega} \end{array} \right] \left[ \begin{array}{cc} \alpha_A \text{ тр} - \alpha_A & \\ \omega_A \text{ тр} - \omega_A & \\ \varphi_{\text{бпла}} \text{ тр} - \alpha_A - \varphi_{\text{бпла}} & \\ \omega_{\text{тр}} - \omega_A - \omega & \end{array} \right]$$

или

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{A \text{ тр}} - \alpha_A = \frac{1}{k_{\alpha_A}} \left( \frac{b \cdot q_{\omega_A} (\omega_{A \text{ тр}} - \omega_A)}{T} - \frac{q_{\phi_{\text{БПЛА}}} (\phi_{\text{БПЛА тр}} - \alpha_A - \phi_{\text{БПЛА}})}{\dot{D}} - \frac{q_{\omega} (\omega_{\text{тр}} - \omega_A - \omega)}{D} \right); \\ \hat{j}_{\text{БПЛА}} - \hat{j}_{\text{нц}} + \hat{j}_{\text{прод нц}} = \frac{1}{k_j} \left( \frac{b \cdot q_{\omega_A} (\omega_{A \text{ тр}} - \omega_A)}{T} + \frac{q_{\phi_{\text{БПЛА}}} (\phi_{\text{БПЛА тр}} - \alpha_A - \phi_{\text{БПЛА}})}{\dot{D}} + \frac{q_{\omega} (\omega_{\text{тр}} - \omega_A - \omega)}{D} \right). \end{array} \right.$$

Выполнение при синтезе условий линейно-квадратично-гауссовской задачи [2–4] позволяет заменить истинные значения координат состояния векторов  $x_{\text{т}}$  и  $x_{\text{у}}$  их оптимальными оценками, тогда алгоритм траекторного управления имеет вид

$$\Delta = \begin{cases} \Delta_A; \\ \Delta_j, \end{cases} \quad (28)$$

где  $\Delta_A = \alpha_{A \text{ тр}} - \hat{\alpha}_A$  – параметр рассогласования, определяющий несоответствие текущего  $\alpha_A$  и требуемого  $\alpha_{A \text{ тр}}$  значений угла отклонения строительной оси антенны;  $\Delta_j = \hat{j}_{\text{БПЛА т}} - \hat{j}_{\text{БПЛА}}$  – параметр рассогласования, определяющий несоответствие текущего  $j_{\text{БПЛА}}$  и требуемого  $j_{\text{БПЛА т}}$  значений поперечного ускорения БПЛА.

Требуемые значения угла отклонения строительной оси антенны и поперечного ускорения БПЛА определяются выражениями соответственно

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{A \text{ тр}} = \frac{1}{k_{\alpha_A}} \left( \frac{b \cdot q_{\omega_A} (\omega_{A \text{ тр}} - \hat{\omega}_A)}{T} - \frac{q_{\phi_{\text{БПЛА}}} (\phi_{\text{БПЛА тр}} - \hat{\alpha}_A - \hat{\phi}_{\text{БПЛА}})}{\hat{D}} - \frac{q_{\omega} (\omega_{\text{тр}} - \hat{\omega}_A - \hat{\omega})}{\hat{D}} \right) + \hat{\alpha}_A; \\ \hat{j}_{\text{БПЛА тр}} = \frac{1}{k_j} \left( \frac{b \cdot q_{\omega_A} (\omega_{A \text{ тр}} - \hat{\omega}_A)}{T} + \frac{q_{\phi_{\text{БПЛА}}} (\phi_{\text{БПЛА тр}} - \hat{\alpha}_A - \hat{\phi}_{\text{БПЛА}})}{\hat{D}} + \frac{q_{\omega} (\omega_{\text{тр}} - \hat{\omega}_A - \hat{\omega})}{\hat{D}} \right) + \hat{j}_{\text{нц}} - \hat{j}_{\text{прод нц}}. \end{array} \right.$$

Анализ полученных моделей состояния, а также сравнительный анализ полученных алгоритмов с алгоритмами наведения, представленными в [2–4], позволяет сделать следующий **вывод**: применение синтезированного алгоритма одновременного управления лучом антенны и поперечным ускорением БПЛА – носителя РЛС позволит обеспечить траекторию полета БПЛА, наиболее благоприятную для радиолокационного наблюдения за наземной целью.

Для формирования сигналов управления в соответствии с алгоритмом (28) необходимо иметь оценки следующих координат:

- дальность  $D$  от БПЛА до НЦ;
- пеленг  $\phi$  НЦ с БПЛА;
- курс БПЛА  $\psi_{\text{БПЛА}}$ ;
- угловая скорость  $\omega$  вращения линии визирования НЦ с БПЛА;
- скорость  $V_{\text{нц}}$  наземной цели;
- поперечное  $j_{\text{нц}}$  и продольное  $j_{\text{прод нц}}$  ускорения НЦ;
- угол отклонения строительной оси антенны  $\alpha_A$ ;
- угловая скорость поворота строительной оси антенны  $\omega_A$ .

Синтезированный алгоритм управления (28) является всевысотным и всеракурсным, обеспечивая устойчивое наблюдение за наземным объектом.

Всевысотность обеспечивается использованием в качестве сигнала управления поперечного ускорения, а не углов отклонения рулей, эффективность которых зависит от высоты. Всеракурсность обеспечивается учетом в законе управления знака и величины  $\omega$ .

Таким образом, синтезированный алгоритм управления (28) является нестационарным, так как коэффициенты передачи учитываемых фазовых координат, определяющие их значимость в формировании результирующего сигнала управления, автоматически адаптируются к условиям наблюдения в зависимости от характера НЦ (подвижная, неподвижная, с ускорением/торможением, и т.п.), осуществляется автоматическое перераспределение приоритетов управления от устранения угловых ошибок на начальном участке к устранению ошибок по точности сопровождения («промахов») на конечном, что позволяет обеспечить наилучшее по точности и экономичности управление БПЛА и реализовать оптимальное по минимуму локального функционала качества управление БПЛА – носителем РЛС при наблюдении за наземной целью.

#### Техническая реализация алгоритма

На рис. 4 представлена функциональная схема, поясняющая техническую реализацию синтезированного алгоритма, а на рис. 5 – этапы, поясняющие процесс наблюдения [7, 8].

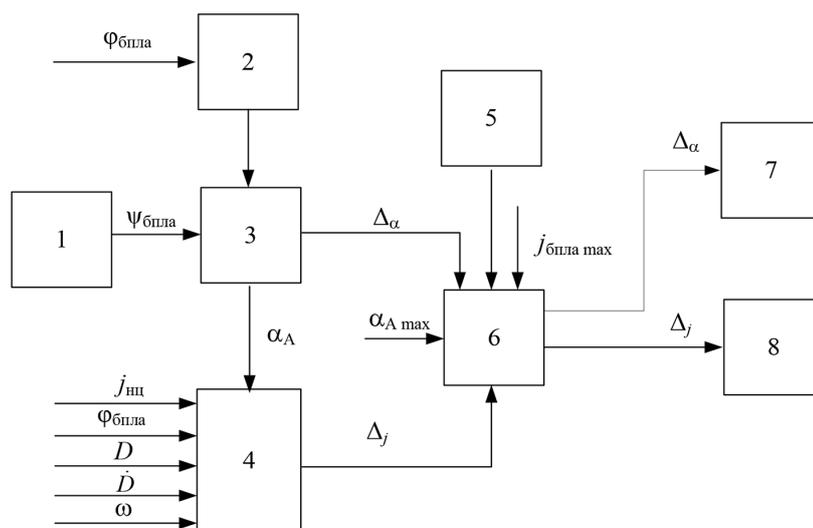


Рис. 4. Функциональная схема, поясняющая способ наблюдения НЦ: (1 – блок автономных датчиков БПЛА, 2 – блок расчета статической пеленгационной характеристики обтекателя БРЛС  $\Delta\varphi_{об}$ , 3 – блок формирования сигнала управления отклонением строительной оси антенны, 4 – блок формирования сигнала управления поперечным ускорением БПЛА, 5 – блок расчета поперечного ускорения БПЛА, 6 – анализатор, 7 – привод антенны, 8 – привод рулей БПЛА)

Fig. 4. Functional diagram explaining the method of observing a ground object: (1 – the unit of autonomous UAV sensors, 2 – the unit for calculating the static direction finding characteristics of the radar fairing  $\Delta\varphi_{об}$ , 3 – signal generation unit for controlling the deviation of the antenna construction axis, 4 – the UAV lateral acceleration control signal generation unit, 5 – the UAV lateral acceleration calculation unit, 6 – the analyzer, 7 – antenna drive, 8 – UAV steering wheel drive)

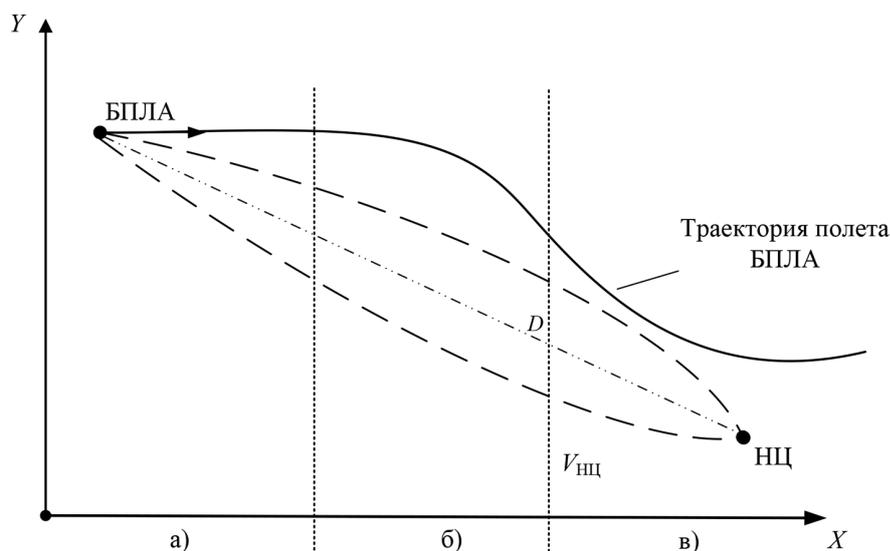


Рис. 5. Этапы сопровождения НЦ в РЛС БПЛА

Fig. 5. The stages of tracking a ground object in an on-board UAV radar station

С блока формирования сигнала управления отклонением строительной оси антенны (рис. 4) на первый вход анализатора поступает сигнал рассогласования  $\Delta_\alpha$ , определяющий несоответствие требуемого и текущего углов отклонения строительной оси антенны в вертикальной плоскости, формируемый с учетом статической пеленгационной характеристики обтекателя  $\Delta\varphi_{об}$ , рассчитываемой в блоке расчета статической пеленгационной характеристики обтекателя БПЛА от угла пеленга. Одновременно на второй вход анализатора с выхода блока формирования сигнала управления поперечным ускорением БПЛА в вертикальной плоскости поступает сигнал  $\Delta_j$  управления БПЛА в вертикальной плоскости, формируемый в соответствии с (28). На третий вход анализатора с выхода блока расчета поперечного ускорения БПЛА в вертикальной плоскости поступает текущее значение поперечного ускорения БПЛА в вертикальной плоскости.

На первом выходе анализатора формируется сигнал  $\Delta_\alpha$  отклонения строительной оси антенны в вертикальной плоскости, поступающий на привод антенны, а сигнал  $\Delta_j$  управления поперечным ускорением БПЛА на втором выходе анализатора не формируется, что обеспечивает прямолинейную траекторию полета БПЛА (рис. 5а).

При достижении угла отклонения строительной оси антенны заданного, близкого к максимальному значения, или рассчитываемое в блоке расчета поперечного ускорения БПЛА в вертикальной плоскости (рис. 4) будет максимально допустимым, на втором выходе анализатора формируется сигнал  $\Delta_j$  управления поперечным ускорением БПЛА в вертикальной плоскости, формируемый в соответствии с (28), который подается на привод рулей БПЛА, а сигнал  $\Delta_\alpha$  отклонением строительной оси антенны на первом выходе анализатора не формируется, что обеспечивает криволинейную траекторию полета БПЛА в вертикальной плоскости (рис. 5б).

При достижении угла полета БПЛА в вертикальной плоскости относительно НЦ значения  $\psi_{бп\text{ла}} = 90^\circ - \alpha_{A \text{ max}}$ , на первом и втором выходах анализатора (рис. 4) одновременно

формируются сигнал управления  $\Delta_\alpha$  отклонением строительной оси антенны, поступающий на привод антенны, возвращающий антенну в нулевое положение относительно строительной оси БПЛА, а также сигнал  $\Delta_j$  управления поперечным ускорением БПЛА в вертикальной плоскости, поступающий на привод рулей БПЛА (рис. 5в), обеспечивая прямолинейную траекторию его полета.

Предложенный способ позволит технически реализовать синтезированный алгоритм управления БПЛА и антенным лучом его бортовой РЛС при наблюдении за НЦ. Ключевыми отличиями способа являются следующие:

во-первых, на начальном этапе полета БПЛА после момента обнаружения НЦ формирование сигнала отклонения строительной оси антенны бортовой РЛС осуществляется с учетом статической пеленгационной характеристики обтекателя БПЛА, поступающего на привод антенны при отсутствующем сигнале управления поперечным ускорением БПЛА в вертикальной плоскости, обеспечивая прямолинейную траекторию его полета;

во-вторых, на следующем этапе полета БПЛА осуществляется формирование сигнала управления его поперечным ускорением в вертикальной плоскости, поступающего на привод рулей при отсутствующем сигнале управления отклонением строительной оси антенны, что позволяет обеспечить криволинейную траекторию полета в вертикальной плоскости при постоянном максимальном угле отклонения строительной оси антенны;

в-третьих, на заключительном этапе осуществляется параллельное формирование сигнала управления отклонением строительной оси антенны, возвращающего её в нулевое положение относительно строительной оси БПЛА, и сигнала управления поперечным ускорением БПЛА в вертикальной плоскости, поступающего на привод его рулей, обеспечивая прямолинейную траекторию полета.

### Вывод

Таким образом, синтезированный алгоритм траекторного управления БПЛА и углом отклонения строительной оси антенны его малогабаритной бортовой РЛС позволяет обеспечить устойчивое наблюдение НЦ в интересах формирования радиолокационных видеокadres требуемого разрешения, пригодных для их комплексной и интеллектуальной потоковой обработки требуемого качества.

В дальнейшем реализация разработанного алгоритма на двух и более БПЛА, функционирующих в группе, позволит обеспечить формирование радиолокационных видеокadres передней зоны обзора в пространственно-распределенной системе малогабаритных бортовых РЛС [1]. Определение требований к взаимному расположению носителей малогабаритных бортовых РЛС, объединенных в группу, выполняющих полетное задание и формирующих радиолокационные видеокadres для передней зоны обзора позволит решить комплексную проблему. Эта проблема требует междисциплинарного подхода, связана, с одной стороны, с обеспечением точности заданной траектории полетов носителей малогабаритных БРЛС и их антенн, с другой – с формированием радиолокационных видеокadres в передней зоны обзора, формируемых в пространственно-распределенной системе малогабаритных БРЛС.

## Список литературы / References

- [1] Ненашев В. А., Сенцов А. А. *Пространственно-распределенные системы радиолокационного и оптического мониторинга: монография*, СПб.: ГУАП, 2022, 191. [Nenashev A. A., Sencov A. A. *Spatially distributed radar and optical monitoring systems: monograph*, SPb, GUAP, 2022, 191. (in Russian)]
- [2] Меркулов В. И., Верба В. С., Ильчук А. Р. *Автоматическое сопровождение целей в РЛС интегрированных авиационных комплексов. Теоретические основы. РЛС в составе интегрированного авиационного комплекса. Т. 1. монография в 3-х томах*, М.: Радиотехника, 2018, 316 [Merculov V. I., Verba V. S., Il'chuk A. R. *Automatic-support of the central control system the radar of integrated aviation complexes. Theoretical bases. Radar as part of an integrated aviation complex. Vol. 1. Monograph in 3 volumes*. Moscow: radio engineering, 2018, 316 (in Russian)]
- [3] Меркулов В. И., Верба В. С., Ильчук А. Р., Колтышев Е. Е. *Автоматическое сопровождение целей в РЛС интегрированных авиационных комплексов. Сопровождение одиночных целей. Т. 2. монография в 3-х томах*, М.: Радиотехника, 2018, 486 [Merculov V. I., Verba V. S., Il'chuk A. R., Koltyshev E. E. *Automatic-support of the central control system the radar of integrated aviation complexes. Support of single goals. Vol. 2. Monograph in 3 volumes*. Moscow: radio engineering, 2018, 486 (in Russian)]
- [4] Верба В. С., и др. *Информационно-измерительные и управляющие радиоэлектронные системы и комплексы: монография*. М.: Радиотехника, 2020, 490 [Verba V. S. *Information-measuring and control radio-electronic systems and complexes: monograph*. Moscow: radio engineering, 2020, 490 (in Russian)]
- [5] Вермишев Ю. Х. *Основы управления ракетами*, М., Военное издательство МО СССР, 1968 г. [Vermishev Yu. K. *Fundamentals of missile control*. М., Military Publishing House? 1968 (in Russian)]
- [6] Горбунов С. А., Мажитов М. В. Способ формирования управляющих сигналов отклонения луча антенны и поперечного ускорения ракеты класса «воздух-воздух» при наведении на вертолет при функционировании его бортового комплекса обороны: *Сборник статей по итогам 46 военно-научной конференции*, Тверь, ВА ВКО, 2023 г. [Gorbunov S. A., Mazhitov M. V. A method for generating control signals for deflecting the antenna beam and transverse acceleration of an air-to-air missile when pointing at a helicopter while its onboard defense system is operating: *Collection of articles on the results of the 46th military Scientific Conference*, Tver, VA VKO, 2023 (in Russian)]
- [7] Горбунов С. А., Кучин А. А., Ненашев В. А., Мажитов М. В., Богданов А. В., Закомолдин Д. В. *Способ самонаведения ракеты «воздух-воздух» с активной радиолокационной головкой самонаведения в вертикальной плоскости на вертолет с бортовым комплексом обороны*: патент 2812306, Российская Федерация, 2024, 6 [S. Gorbunov, A. Kuchin, V. Nenashev, M. Mazhitov, A. Bogdanov, D. Zakomoldin. *A method of homing an air-to-air missile with an active radar homing head in a vertical plane onto a helicopter with an on-board defense system*: patent 2812306, Russian Federation. 2024, 6 (in Russian)]
- [8] Дудник П. И., Кондратенков Г. С., Татарский Б. Г., Ильчук А. Р., Герасимов А. А. *Авиационные радиолокационные комплексы и системы*, М., ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 2006, 1112 [Dudnik P. I., Kondratenkov G. S., Tatarsky B. G., Ilychuk A. R., Gerasimov A. A. *Aviation radar complexes and systems*, М., VVIA im. N. E. Gukovsky, 2006, 1112 (in Russian)]

[9] Сколник М.И. *Справочник по радиолокации. В 2 кн. Кн. 1.*, М., Техносфера, 2014, 672 [Skolnik M.I. *Radar Handbook. Vol. 1. In 2 volumes*, М., Tahnosfere, 2014, 672 (in Russian)]

[10] Зайцев Д.В. *Многопозиционные радиолокационные системы. Методы и алгоритмы обработки информации в условиях помех*, М., Радиотехника, 2007, 421 [Zaitsev D.V. *Multi-position radar systems. Information processing methods and algorithms under interference conditions*. М., Radio engineering, 2007, 421 (in Russian)]

[11] Бакулев П.А. *Радиолокационные системы*, М.: Радиотехника, 2015, 440 [Bakulev P.A. *Radar systems*. М.: Radio engineering, 2015, 440 (in Russian)]

[12] Ненашев В.А., Сенцов А.А., Шепета А.П. Двухпозиционная модель формирования радиолокационного изображения высокого разрешения в передних зонах обзора бортовых РЛС. *Сборник статей Международной научно-практической конференции, Т. 3*, Магнитогорск: МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2017. [Nenashev V.A., Sentsov A.A., Shepeta A.P. A two-position model for generating a high-resolution radar image in the forward viewing areas of on-board radars: *Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference*, Magnitogorsk, MTS OMEGA SCIENCES, 2017 (in Russian)]

[13] Меркулов В.И., Верба В.С. *Синтез и анализ авиационных систем радиоуправления. Книга 1. Теоретические основы построения и разработки*, М., Радиотехника, 2023, 404 [Merkulov V.I., Verba V.S. *Synthesis and analysis of aviation radio control systems. Book 1. Theoretical foundations of construction and development*, М., Radio Engineering, 2023, 404 (in Russian)]

[14] Меркулов В.И., Верба В.С. *Синтез и анализ авиационных систем радиоуправления. Книга 2. Оптимизация методов самонаведения и их информационного обеспечения*, М., Радиотехника, 2023, 364 [Merkulov V.I., Verba V.S. *Synthesis and analysis of aviation radio control systems. Book 2. Optimization of homing methods and their information support*, М., Radio Engineering, 2023, 364 (in Russian)]



**Math Modeling.  
Numerical Experiment**

**Математическое  
моделирование.**

**Численный  
эксперимент**



EDN: RKMAQB

УДК 681.513.63

## Model-Oriented Design of a Discrete One-Dimensional Extremal Control System

Gennadiy B. Masalsky\* and Ruslan T. Galemov\*  
*Siberian Federal University  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 20.10.2025, received in revised form 26.10.2025, accepted 06.11.2025

**Abstract.** The article focuses on model-oriented design of one-dimensional discrete extremal control systems (ECS), enhancing their efficiency under conditions of uncertainty and noise. An analysis of research on parameter adaptation for extremal controllers is conducted, and an extremal control system with controller parameter adaptation is developed. The plant model is represented as a unimodal function with additive noise, and the problem of ECS parameter optimization is formulated as a minimization problem for an integral performance criterion. Linear and quadratic extrapolators, the Recursive Least Squares (RLS) method, and a PI-controller are employed for the adaptation of the operating step size. An analysis of the influence of integral performance criteria on the quality of control processes is performed. The research confirms that the extremal PI-controller demonstrates the best performance, including noise immunity and minimal error in the vicinity of the extremum. The practical significance of the work lies in the development of adaptive algorithms for control systems with nonlinear and stochastic characteristics, applied to problems in robotics and the control of complex technological processes. The use of integral criteria focused on minimizing control error is recommended for the design of ECS under high uncertainty conditions.

**Keywords:** extremal control systems, adaptive algorithms, PI-controller, search optimization.

Citation: Masalsky G. B., Galemov R. T. Model-Oriented Design of a Discrete One-Dimensional Extremal Control System. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2025, 18(8), 1100–1122. EDN: RKMAQB



© 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: gmasalsky@sfu-kras.ru

# Модельно-ориентированное проектирование дискретной одномерной системы экстремального управления

Г. Б. Масальский, Р. Т. Галемов  
Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск

**Аннотация.** Статья посвящена модельно-ориентированному проектированию дискретных одномерных систем экстремального управления (СЭУ), повышению их эффективности в условиях неопределенности и помех. Проведен анализ работ по адаптации параметров экстремальных регуляторов, разработана система экстремального управления с адаптацией параметров регулятора. Модель объекта управления представлена унимодальной функцией с аддитивной помехой, а задача оптимизации параметров СЭУ сформулирована как задача минимизации интегрального критерия качества. Для адаптации рабочего шага использованы линейный и квадратичный экстраполяторы, рекуррентный метод наименьших квадратов (РМНК) и ПИ-регулятор. Проведен анализ влияния интегральных критериев эффективности на качество процессов управления. Исследования подтвердили, что экстремальный ПИ-регулятор демонстрирует наилучшие показатели, включая устойчивость к помехам и минимальную ошибку в области экстремума. Практическая значимость работы заключается в разработке адаптивных алгоритмов для систем управления с нелинейными и стохастическими характеристиками в задачах робототехники, управления сложными технологическими процессами. Рекомендовано использование интегральных критериев, ориентированных на минимизацию ошибки управления, для проектирования СЭУ в условиях высокой неопределенности.

**Ключевые слова:** системы экстремального управления, адаптивные алгоритмы, ПИ-регулятор, поисковая оптимизация.

Цитирование: Масальский Г. Б. Модельно-ориентированное проектирование дискретной одномерной системы экстремального управления / Г. Б. Масальский, Р. Т. Галемов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(8). С. 1100–1122. EDN: RKMAQB

## Введение

Системы экстремального регулирования, как класс адаптивных систем управления, предложены, теоретически обоснованы и реализованы в 20–70-х годах прошедшего столетия [1–3].

В настоящее время реализуются сложные технологические процессы, автономные мобильные платформы, цифровизация технологических процессов, широкие возможности микроконтроллеров, рекуррентные процедуры идентификации и управления открывают новые горизонты для систем экстремального управления (СЭУ).

СЭУ позволяют адаптироваться к меняющимся условиям, оптимизировать свои параметры в реальном времени и применяются в ситуациях, когда точная математическая модель системы неизвестна или слишком сложна для аналитического решения.

В традиционном применении методов поиска экстремума предполагалось, что оптимальные параметры объекта управления меняются довольно медленно. При этом игнорировались динамические характеристики системы, и алгоритм анализировался и проектировался с использованием традиционных техник «статической оптимизации» [5].

Существует два основных подхода к поиску экстремума:

- с использованием непрерывного зондирующего сигнала для исследования устойчивого состояния объекта, из которого может быть получен приближенный неявный градиент, как описано в [6, 7].

- с использованием (повторяющейся) последовательности постоянных зондирующих входов, которые используют подходы методов численной оптимизации [8, 9].

Адаптивные системы управления включающие, экстремальные регуляторы, имеют два способа реализации. В первом способе экстремальный регулятор в качестве адаптера регулятора с обратной связью. В [10] используется экстремальный регулятор с зондирующим сигналом для настройки параметров ПИД регулятора по бегущему среднему квадрата ошибки. В [11] поиск экстремума используется для настройки коэффициента усиления безмодельного регулятора. В [6] экстремальный регулятор настраивает зону нечувствительности для пропорционального регулятора.

Во втором способе экстремальный регулятор напрямую меняет управляющее воздействие. В [9] описано семейство экстремальных регуляторов, основанных на методах нелинейного программирования.

Оба способа реализации требуют определения величины шага поиска. В [12] величина шага поиска на каждом шаге уменьшается по детерминированному закону. Такой способ прост в реализации, но обладает множеством недостатков, таких как медленная сходимость, чувствительность к начальному значению шага поиска, отсутствие адаптивности к поверхности целевой функции. Эти недостатки могут приводить к замедлению процесса поиска, субоптимальной траектории поиска, установлению колебательного процесса в районе оптимума и застреванию в локальном оптимуме.

В статьях [5, 9, 13] используется алгоритм линейного поиска шага, описанный в [14]. Такой подход позволяет адаптивно определять шаг поиска, однако содержит недостатки, среди которых: повышенная вычислительная нагрузка; зависимость от начального направления и шага; повышенная сложность в многомерных пространствах.

В предлагаемой статье изложен подход модельно-ориентированного проектирования и исследования модифицированных шаговых алгоритмов поиска на базе одномерного последовательного симплексного метода (ПСМ) и СЭУ с оптимизируемым ПИ-регулятором.

### Постановка задачи

Модель объекта управления

$$y(k) = Q(u(k)) + V(k), \quad (1)$$

где  $Q(\cdot)$  – неизвестная унимодальная функция,  $y(k)$  – измеренное (вычисленное) значение целевой функции ОУ в момент времени  $k$ ;  $V(k)$  – аддитивная помеха (не измеряемая);  $u(k)$  – управляющее воздействие (текущая точка поиска, управление).

Структурная схема дискретной одномерной СЭУ представлена на рис. 1.

Задача экстремального регулирования состоит в том, чтобы текущее управление обеспечивало экстремум измеряемой (вычисляемой) целевой функции.

$$Q(u(k)) \rightarrow \min_{u(k) \in U}, \quad (2)$$

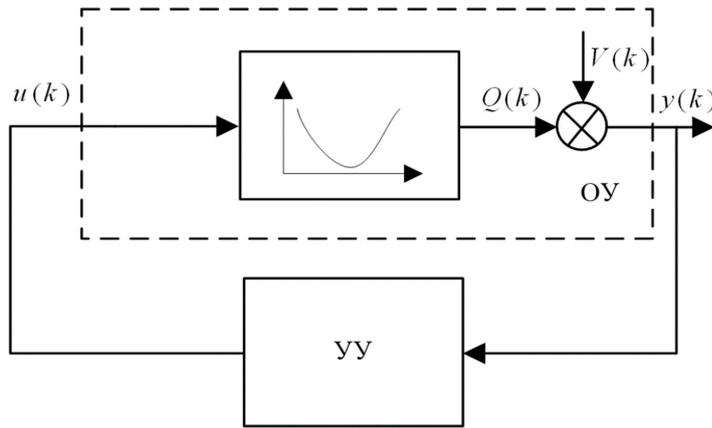


Рис. 1. Структурная схема СЭУ: УУ – устройство управления; ОУ – объект управления

Fig. 1. Structural diagram of the ECS

где  $U = \{u : u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max}\}$ .

Процесс поиска минимума реализуется рекуррентной процедурой

$$u(k+1) = u(k) + \Delta u(k), \quad k = 1, 2, 3, \dots, N, \quad (3)$$

где  $\Delta u(k) = a(k) \cdot p(k)$  – изменение управляющего воздействия на  $k$ -м шаге поиска;

$$p(k) = p(k-1) \operatorname{sign}[-\Delta y(k)] = \begin{cases} p(k-1), & \Delta y(k) < 0, \\ -p(k-1), & \Delta y(k) \geq 0, \end{cases} \quad \text{– направление поиска; } a_{\min} \leq a(k) \leq a_{\max} \text{ –}$$

величина рабочего шага, определяется технологическими режимами оборудования;  $\Delta y(k) = y(k) - y(k-1)$  – приращение выходной переменной.

Постановка задачи (2) и метод решения (3) – это классическая постановка задачи нелинейного программирования. Поскольку вид функции неизвестен, то метод решения – поисковая оптимизация (методы нулевого порядка) непосредственно на ОУ.

Эффективность СЭУ определяется свойствами ОУ и УУ. Свойства ОУ изменить нельзя, а вот свойства УУ определяются при проектировании СЭУ. Эти свойства зависят от выбранного интегрального критерия эффективности. При синтезе параметрически-оптимизируемых систем часто используют квадратичные критерии эффективности [4]

$$S_{eu}^2 = \sum_{k=1}^N (e^2(k) + r \Delta u^2(k)), \quad (4)$$

где  $e(k) = q^*(k) - y(k)$  – ошибка управления;  $q^*(k) = Q^*(k)$ ;  $\Delta u(k) = u(k) - u^*(k)$  – отклонения управляющего воздействия от оптимального;  $r$  – весовой коэффициент (штраф). Выбор весового коэффициента  $r$  перераспределяет затраты на управление. Чем больше  $r$ , тем меньше изменение  $u(k)$ , тем больше ошибка  $e(k)$ , т.е. система управления становится более инерционной.

Составляющая  $\Delta u^2(k)$  определяет затраты на поиск экстремума  $u^*(k)$ , которые включают смещение на один шаг поиска, быстродействие системы и уменьшаются с ростом величины рабочего шага  $a(k)$  и с уменьшением временных затрат на достижение  $u^*(k^*)$ , где  $k^*$  – шаг, на котором достигнут экстремум.

Составляющая  $e^2(k)$  – определяет потери на рысканье в области экстремума  $Q^*(k)$ .

Также применяют критерии

$$J_e = \sum_{k=1}^N \sqrt{e(k)^2}, \quad (5)$$

$$J_{ke} = \sum_{k=1}^N k \sqrt{e(k)^2}. \quad (6)$$

Эти критерии используют при проектировании как детерминированных, так и стохастических систем.

Для оценки качества процессов управления используем среднеквадратическую ошибку управления на один шаг поиска

$$S_e = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e^2(k)}, \quad (7)$$

среднеквадратические отклонения управляющего воздействия на один шаг поиска

$$S_u = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Delta u^2(k)}, \quad (8)$$

максимальное перерегулирование

$$y_{\varepsilon_m} = y_{\min}(k^*) - q^*(k), \text{ либо } \varepsilon u_{\max} = u(k^*) - u_{opt}(k). \quad (9)$$

$k^*$  – дискретное время достижения экстремума  $u(k^*)$ .

Для исследований выбраны выпуклые вниз кусочно-линейная и квадратичная модели, отражающие процесс поиска вдали от экстремума (10) и в области экстремума (11)

$$Q_1(u(k)) = Q^*(k) + K_1 |u(k) - u^*(k)|, \quad (10)$$

$$Q_2(u(k)) = Q^*(k) + K_2 (u(k) - u^*(k))^2. \quad (11)$$

Здесь  $Q^*(k)$ ,  $u^*(k)$  – оптимальное значение целевой функции и управляющего воздействия,  $K_1$  – параметр, определяющий наклон прямых линий,  $K_2$  – параметр, определяющий кривизну функции.

### Адаптация параметров регулятора

*Адаптация рабочего шага с использованием  
экстраполятора (Adapt1, Adapt2)*

Поскольку структуры модели целевой функции (10), (11) заданы, то можно воспользоваться простыми процедурами оценки их параметров по результатам первых шагов поиска. Полученные оценки параметров позволяют оценить  $\hat{u}^*(k+1)$ , т.е. спрогнозировать (экстраполировать) следующий (k+1) шаг поиска.

Так, для модели (10) после экспериментов в двух точках  $u(k-1)$  и  $u(k)$ , используя уравнение прямой, проходящей через три точки  $[u(k-1), y(k-1)]$ ,  $[u(k), y(k)]$ ,  $[u^*(k+1), Q^*(k+1)]$ , определяемой определителем

$$\begin{vmatrix} u(k) - u(k-1) & y(k) - y(k-1) \\ u^*(k+1) - u(k-1) & Q^*(k+1) - y(k-1) \end{vmatrix} = 0,$$

из которого следует

$$u^*(k+1) = u(k-1) + \frac{(Q^*(k+1) - y(k-1))(u(k) - u(k-1))}{(y(k) - y(k-1))}, \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} a(k) &= u^*(k+1) - u(k) \\ p(k) &= \text{sign } a(k) \\ Q^*(k) &= q^*(k) \end{aligned} \right\}, \quad k = 2, 3, \dots \quad (13)$$

для  $|y(k) - y(k-1)| \geq \delta$ , иначе  $|a(k)| = |a(k-1)|$ .

Здесь  $Q^*(k) = q^*(k)$  – известное заранее или предполагаемое,  $\delta = 0.01 \hat{A}(k-1)$  – уровень порога.

Оценка уровня полезного сигнала на  $k$ -ом шаге

$$\hat{A}(k) = \Delta y(k) = |y(k) - y(k-1)|. \quad (14)$$

Для кусочно-линейной функции (10) экстремум  $u^*(k)$  будет найден на третьем шаге.

Модель (11) раскроем в виде

$$Q_2(u(k)) = [Q^*(k) + K_2 u^*(k)^2] - 2K_2 u^*(k) \cdot u(k) + K_2 \cdot u(k)^2. \quad (15)$$

Перепишем (15) в виде

$$Q_2(u(k)) = b_1 + b_2 u(k) + b_3 u(k)^2. \quad (16)$$

Для оценки параметров (16) по трем шагам поиска составим систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} b_1 + b_2 u(k-2) + b_3 u(k-2)^2 &= Q(k-2) \\ b_1 + b_2 u(k-1) + b_3 u(k-1)^2 &= Q(k-1) \\ b_1 + b_2 u(k) + b_3 u(k)^2 &= Q(k) \end{aligned} \right\}. \quad (17)$$

Система уравнений имеет решение, если ее определитель не равен нулю

$$\begin{vmatrix} 1 & u(k-2) & u(k-2)^2 \\ 1 & u(k-1) & u(k-1)^2 \\ 1 & u(k) & u(k)^2 \end{vmatrix} = \begin{aligned} &u(k-1) \cdot u(k)^2 - u(k) \cdot u(k-1)^2 - \\ &u(k-2) \cdot u^2(k) + u(k) \cdot u(k-2)^2 + \\ &+ u(k-2) \cdot u(k-1)^2 - u(k-1) \cdot u(k-2)^2 \neq 0 \end{aligned} \quad (18)$$

В системе (17) значения  $u(k)$  могут быть не кратны шагу поиска  $\Delta u(k)$ , например при переменном шаге поиска.

Если рабочий шаг поиска  $a(k) = a(k-1) = a(k-2)$ , то выражения (17) и (18) упрощаются и оценки параметров модели (16) на  $k$ -ом шаге поиска равны

$$b_3(k) = K_2(k) = \frac{[y(k) - 2y(k-1) + y(k-2)]}{2a(k)^2}, \quad (19)$$

$$b_2(k) = [-2 \cdot K_2 \cdot u^*(k)] = \frac{1}{2a(k)^2} \left[ \begin{aligned} &3y(k) \cdot a(k) - 4y(k-1) \cdot a(k) + y(k-2) \cdot a(k) - \\ &- 2y(k) \cdot a(k) + 4y(k-1)u(k-1) - 2y(k-2) \cdot u(k) \end{aligned} \right], \quad (20)$$

$$b_1(k) = [Q^*(k) + K_2 \cdot u^*(k)^2] = \frac{1}{2a(k)^2} \begin{bmatrix} 2y(k) \cdot a(k)^2 + y(k) \cdot u(k)^2 - \\ -2y(k-1) \cdot u(k)^2 + y(k-2) \cdot u(k)^2 - \\ -3y(k) \cdot a(k) \cdot u(k) + 4y(k-1) \cdot a(k) \cdot u(k) - \\ -y(k-2) \cdot a(k) \cdot u(k) \end{bmatrix} \quad (21)$$

Для оценки  $u^*(k+1)$ , продифференцируем уравнение (16)

$$\frac{dQ(u(k))}{du(k)} = \hat{b}_2(k) + 2\hat{b}_3(k) \cdot u^*(k+1) = 0 \quad (22)$$

и найдем

$$u^*(k+1) = -\hat{b}_2(k) / (2\hat{b}_3(k)), \quad (23)$$

$$Q^*(k+1) = b_1(k) - b_3(k) \cdot u^*(k+1)^2. \quad (24)$$

Для неравных значений  $a(k)$  последних трех шагов, необходимо использовать оценки параметров  $b_2$  и  $b_3$  из решения системы уравнений (17).

Для равных значений  $a(k)$  последних трех шагов используем оценки (19), (20).

Значение рабочего шага  $a(k)$  и направление движения на  $k$ -ом шаге

$$a(k) = u^*(k+1) - u(k), \quad (25)$$

$$p(k) = \text{sign}(a(k)). \quad (26)$$

При достижении области экстремума необходимо уменьшать рабочий шаг  $a(k)$ , например, согласно последовательности

$$a(k) = a(k-1) \cdot q_1. \quad (27)$$

$$q_1 = N_1 \sqrt{\frac{a_{\min}}{a_{\max}}},$$

где  $N_1$  – число шагов поиска, за которое рабочий шаг после достижения экстремума уменьшится от  $a_{\max}$  до технологически допустимого  $a_{\min}$ . При поиске вдали от экстремума с целью уменьшения времени поиска можно увеличивать рабочий шаг

$$a(k) = a(k-1) \cdot q_2, \quad (28)$$

$$q_2 = N_2 \sqrt{\frac{a_{\max}}{a_{\min}}},$$

где  $N_2$  – число шагов поиска, за которое рабочий шаг увеличится от  $a_{\min}$  до  $a_{\max}$ .

Условием достижения экстремума моделей (10) и (11) можно считать

$$|y(k) - Q^*(k)| < \delta, \quad (29)$$

где  $y(k)$ ,  $Q^*(k)$  – измеренное и прогнозируемое значение выходной переменной ОУ,  $\delta$  – уровень порога.

Таким образом, принятием решения о достижении экстремума и, следовательно, уменьшении рабочего шага  $a(k)$  является выполнение условия (29), смена направления поиска  $p(k)$

на противоположное, иначе увеличиваем  $a(k)$  согласно (28), и движемся в том же направлении  $p(k) = p(k - 1)$

*Экстремальное управление в обстановке помех [2]*

Пусть помеха  $V(k)$  имеет математическое ожидание и дисперсию

$$M\{V\} = m_V, D\{V\} = \sigma_V^2.$$

Вероятность ошибочного шага [2]

$$P_{ou} = P(\xi > a(k) \cdot \text{grad}Q(u(k))), \quad (30)$$

где  $\xi = V(k) - V(k - 1)$ , с параметрами  $M(\xi) = 0$ ,  $D(\xi) = 2\sigma_V^2$ .

Для нормального закона распределения помехи  $V$  вероятность ошибочного шага равна

$$P_{ou} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \Phi \left( \frac{A(k)}{2\sigma_V} \right) \right], \quad (31)$$

где  $\Phi(\cdot)$  – функция Лапласа. Поскольку  $\Phi > 0$ , то всегда  $P_{ou} < \frac{1}{2}$ , независимо от уровня помех.

График вероятности (31) ошибки приведен на рис. 2

Среднее смещение к цели  $u^*$  определено выражением [2]

$$S(k) = |a(k)| \cdot \Phi \left( \frac{|A(k)|}{2\sigma_V} \right), \quad (32)$$

и приведено на рис. 3.

Для самонастройки параметров СЭУ в условиях помех можно использовать увеличение  $|A(k)|$  и уменьшение  $\sigma_V$ .

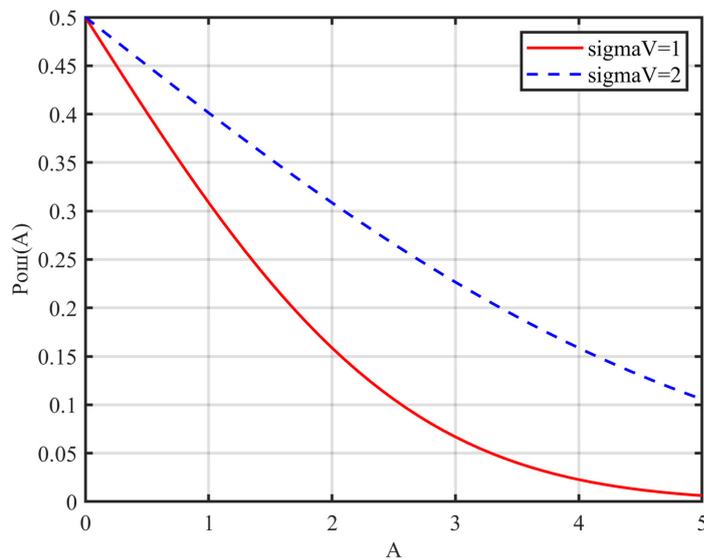


Рис. 2. Зависимость вероятности ошибки от уровня полезного сигнала  $A(k)$  и уровня помех  $\sigma_V = 1$  и  $\sigma_V = 2$

Fig. 2. Dependence of error probability on the useful signal level  $A(k)$  and interference levels  $\sigma_V = 1$  and  $\sigma_V = 2$

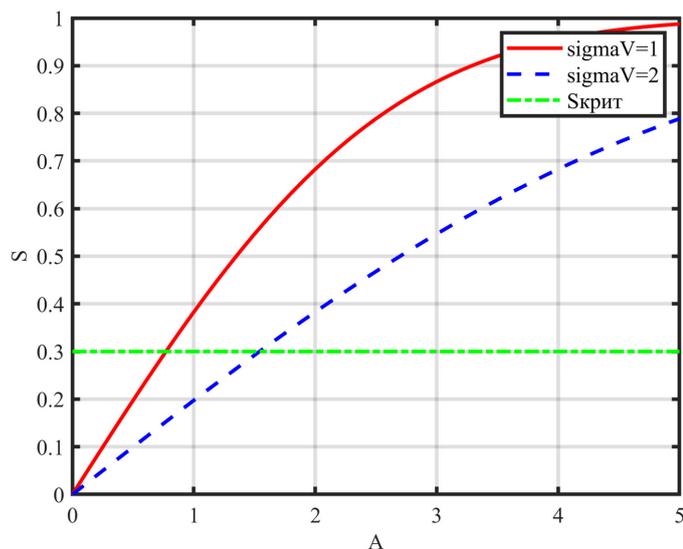


Рис. 3. Среднее смещение к цели в условиях помех

Fig. 3. Mean target displacement under interference conditions

Уменьшение  $\sigma_V$  можно достичь проведением  $m$  повторных измерений на каждом шаге поиска, что позволит уменьшить уровень помехи в  $\sqrt{m}$  раз, но при этом снижается быстродействие поиска на этапе спуска, если учитывать затраты на измерение в критерии эффективности.

Для оценки дисперсии помехи на  $k$ -ом шаге рассчитываем среднее значение (оценку математического ожидания)

$$\bar{y}(k) = \frac{\sum_{j=1}^m y_{\text{повт.}}(j)}{m} \quad (33)$$

и оценку дисперсии помех на каждом шаге, где проводятся повторные измерения, т.е. с учетом результатов предыдущих шагов

$$s_V^2(k) = \frac{N_{\text{повт.}} s_V^2(k-1) + \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (y_{\text{повт.}}(j) - \bar{y}(k))^2}{N_{\text{повт.}} + 1}, \quad (34)$$

где  $y_{\text{повт.}}(j)$  – значения выхода объекта при повторных измерениях в текущей точке ( $y_{\text{повт.}}(1) = y(k)$ ) – первый эксперимент в текущей точке).

Для принятия решения об увеличении числа повторных измерений  $m$  необходимо оценить, где находится СЭУ: на этапе спуска или в области экстремума?

Если СЭУ в области экстремума, то выполняется условие (29).

К этому времени выполнено достаточно повторных измерений ( $k > 10$ ) для оценки дисперсии помехи  $\sigma_V^2$  и среднего смещения (32).

При низком уровне полезного сигнала, особенно для квадратичной целевой функции (11), и высоком уровне помех введем сглаживание среднего смещения  $S(k)$ .

$$S(k) = \alpha S(k) + (1 - \alpha) \cdot S(k-1), \quad (35)$$

где  $\alpha = \frac{2}{(N_0 + 1)}$  – коэффициент сглаживания;  $N_0 = [4 \div 7]$  – интервал сглаживания.

Для процедур РМНК оценка дисперсии помехи равна остаточной дисперсии, при условии структурной адекватности постулируемой модели объекту.

Если среднее смещение (32)

$$S(k) < S_{\text{крит}} \quad (36)$$

и выполняется условие ( $k > 10$ ), то следует увеличить число повторных экспериментов  $m = m + 1$ , но не более  $m \leq 5$ .

Здесь  $S_{\text{крит}}$  выбирается априори согласно рис. 3 либо по результатам модельного проектирования.

#### *Использование рекуррентных алгоритмов идентификации (Adapt3, Adapt4)*

Для оценки параметров целевой функции  $Q(u(k))$  (1) используем рекуррентные процедуры. Модель (10) представим в виде

$$\hat{Q}_1(u(k)) = \hat{b}_1(k) + \hat{b}_2(k) \cdot u(k), \quad (37)$$

где  $\hat{b}_1(k) = \hat{Q}_1(u(0))$  – начальная координата,  $\hat{b}_2(k)$  – угловой коэффициент.

Для расчета оценки  $\hat{u}^*(k)$  на  $k$ -ом шаге поиска при заданном значении  $q^*(k)$  необходимо решить систему уравнений пересечения прямой (37) и прямой  $q^*(u(k))$ , параллельной оси  $u(k)$ .

Если  $q^*(k)$  известно, то для модели (37) с учетом (12) имеем

$$\hat{u}^*(k+1) = u(k-1) + \frac{q^*(k) - \hat{b}_1(k)}{\hat{b}_2(k)}. \quad (38)$$

Рабочий шаг  $a^*(k)$ , направление поиска и прогноз  $\hat{Q}^*(k)$  согласно (13).

В процессе поиска оценки  $\hat{b}_1(k)$  и  $\hat{b}_2(k)$  будут меняться (уточняться), а в области экстремума они кардинально изменятся (значения и знаки). В этом случае необходимо отключить режим экстраполятора, ограничить рабочий шаг  $a_{\min} \leq a_k \leq a_{\max}$  и использовать условие (29) для принятия решения.

Модель (11) представим в виде

$$\hat{Q}_2(u(k)) = \hat{b}_1(k) + \hat{b}_2(k)u(k) + \hat{b}_3(k)u(k)^2, \quad (39)$$

где  $\hat{b}_1(k) = \hat{Q}_2(u(0))$  – начальная координата.

Соответственно,

$$\hat{u}^*(k) = -\frac{\hat{b}_2(k)}{2\hat{b}_3(k)}, \quad (40)$$

а предсказанное значение  $\hat{Q}^*(k+1)$  согласно (24).

Для вычисления оценок параметров моделей используем РМНК

$$\hat{\mathbf{b}}(k) = \hat{\mathbf{b}}(k-1) + \frac{C(k-1) \cdot \mathbf{x}(k)}{1 + \mathbf{x}^T(k) \cdot C(k-1) \cdot \mathbf{x}(k)} \left[ y(k) - \hat{\mathbf{b}}^T(k-1) \cdot \mathbf{x}(k) \right]; \quad (41)$$

где  $\mathbf{x}(k)$  – вектор-столбец наблюдаемых линеаризованных переменных размерности  $(1 \times n = 1)$ ,  $y(k)$  – наблюдаемое значение выходной переменной;  $\hat{\mathbf{b}}(k)$ ,  $\hat{\mathbf{b}}(k-1)$  – вектор-столбец оценок параметров модели на текущем и предыдущем шаге поиска,  $C(k)$  – ковариационная матрица оценок.

Для модели (10) вектор-столбец линеаризованных переменных

$$\mathbf{x}(k) = [1; u(k)], \quad (42)$$

для модели (11)

$$\mathbf{x}(k) = [1; u(k); u(k)^2]. \quad (43)$$

#### Параметрически-оптимизируемые регуляторы (Adapt 5)

Преобразуем структурную схему одномерной СЭУ (см. рис. 1) к виду, представленному на рис. 4

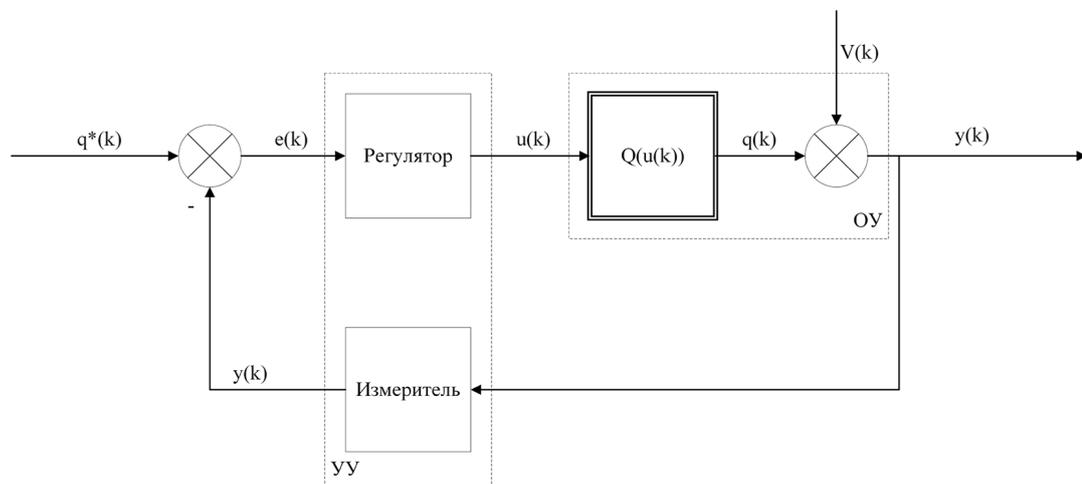


Рис. 4. Структурная схема СЭУ с управлением по ошибке: УУ – устройство управления; ОУ – объект управления

Fig. 4. Structural diagram of the ECS with error-based control

Здесь  $q^*(k)$  – заданное значение выходной переменной в момент времени  $k$ ,  $e(k) = q^*(k) - y(k)$  – ошибка управления.

В качестве регулятора используем дискретный ПИ-регулятор с передаточной функцией [4]

$$W_R(z) = \frac{d_0 + d_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}}, \quad (44)$$

или разностным уравнением (рекуррентный алгоритм)

$$u(k) = u(k-1) + p(k) \cdot (d_0 \cdot e(k) + d_1 \cdot e(k-1)), \quad (45)$$

где  $d_0$  – коэффициент передачи;  $c_1 = \frac{d_0 + d_1}{d_0}$  – коэффициент интегрирования,  $e(k) = \sqrt{(q^*(k) - y(k))^2}$  либо  $e(k) = (q^*(k) - y(k))^2$ .

Выбор направления поиска:

если  $e(k) - e(k-1) > 0$ , то

$$p(k) = -p(k-1), \quad (46)$$

т.е. меняем предыдущее направление поиска, иначе

$$p(k) = p(k-1).$$

Величина рабочего шага

$$a(k) = d_0 e(k) + d_1 e(k-1). \quad (47)$$

### Настройка параметров регулятора

Задача настройки параметров регулятора («Оптимизатор») реализуется по интегральному критерию

$$J(e(k)) \rightarrow \min_{\lambda \in \Lambda}, \quad (48)$$

где  $\lambda$  – вектор параметров регулятора размерности  $(n \times 1)$ ,  $\Lambda$  – допустимое множество значений параметров регулятора  $\Lambda = \{\lambda : \lambda_{i\min} \leq \lambda_i \leq \lambda_{i\max}, i = 1, n\}$ .

Периодичность настройки параметров регулятора определяется технологическим циклом и динамикой их изменения. Решение может приниматься в ходе технологического процесса по мере увеличения величины интегрального критерия (48) на фиксированном интервале эксплуатации, например минуты, часы, дни и т.д. Если процесс стабильный, то, возможно, достаточно однократной настройки. Если условия в ОУ изменяются с периодом, то по итогам предыдущего периода осуществляют настройку параметров регулятора на следующий цикл.

Задача (48) многомерная. Учитывая нелинейность и стохастичность ОУ, а соответственно, и функции  $J(e(k))$ , следует использовать метод нулевого порядка, последовательный симплексный метод (ПСМ), генетический алгоритм и другие.

Таким образом, в СЭУ действует параллельно два контура адаптации (рис. 5), первый Adapt(·) корректирует параметры рабочего шага  $a(k)$  регулятора на каждом шаге поиска. Второй – «Оптимизатор», корректирует параметры процедур Adapt(·) по одному из критериев (4), (5), (6) на периоде, кратном первому контуру

$$j = j \begin{cases} 0, & \text{при } \Delta k(j) < N_n \\ 1, & \text{при } \Delta k(j) \geq N_n, \end{cases} \quad (49)$$

где  $\Delta k_j = k(j) - k(j-1)$ ;  $N_n$  – шаг оптимизации контура «Оптимизатор».

### Выбор границ допустимого множества параметров $\Lambda$

Корректный выбор позиционных и функциональных ограничений допустимого множества  $\Lambda$  во многом определяет затраты времени на решение и реализацию задачи (48) (время поиска, учет технологических ограничений, методы оптимизации и т.п.). Моделирование СЭУ для различных интегральных критериев и моделей объекта управления  $Q(k)$  реализо-

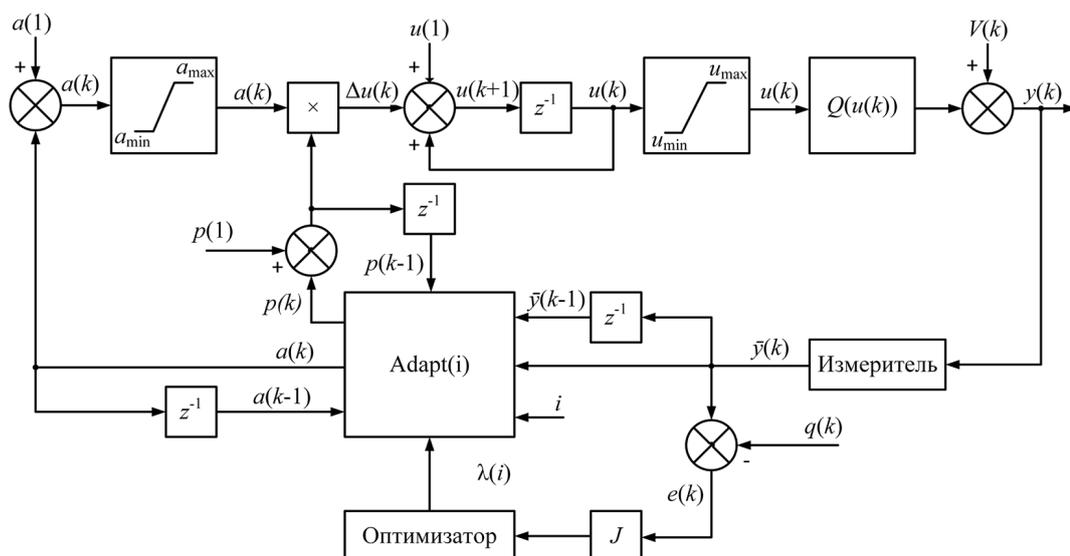


Рис. 5. Структурная схема самоорганизующейся дискретной СЭУ с адаптерами и «Оптимизатором»

Fig. 5. Structural diagram of a self-organizing discrete ECS with adapters and an “Optimizer”

вано для относительных единиц, что позволяет перейти к реальным границам и параметрам множества  $\Lambda$ .

Для выявления допустимых границ множества параметров  $\Lambda$  построим поверхности зависимости интегрального критерия (4) от следующих пар параметров СЭУ:  $\{N_1, N_2\}$ ,  $\{a_{\min}, a_{\max}\}$ ,  $\{d_0, d_1\}$ ,  $\{S_{\text{крит}}, r\}$ ,  $\{\delta, m\}$ .

Исходные данные для исследования. Параметры модели (10):  $K_1 = 1$ ,  $u^*(k) = 10$ ,  $Q^*(k) = 0$ . Начальные условия:  $p(1) = 1$ ,  $u(1) = 0$ ,  $a(1) = a_{\max}$ ,  $N = 60$ .

Параметры модели (11):  $K_2 = 0.1$ ,  $u^*(k) = 10$ ,  $Q^*(k) = 0$ . Начальные условия:  $p(1) = 1$ ,  $u(1) = 0$ ,  $a(1) = a_{\max}$ ,  $N = 60$ . Исходные (базовые) и граничные значения параметров адаптивных регуляторов, *Adapt1* ÷ *Adapt4* приведены в табл. 1, для экстремального ПИ-регулятора (*Adapt5*) в табл. 2.

Для процедуры адаптации шага с линейным экстраполятором (*Adapt1*) получены следующие поверхности (рис. 6–9):

Анализ представленных поверхностей отражает наличие эффективных зон параметров, схожих по характеру для обеих моделей, но отличных по значению функции  $S_{\text{ев}}^2$ . Квадратичная модель имеет меньшие значения функции  $S_{\text{ев}}^2$ . Влияние пары  $\{\delta, m\}$  (рис. 9) существенно для квадратичной модели в условиях помех. Увеличение параметра  $r$  функции  $S_{\text{ев}}^2$  (рис. 8) увеличивает потери на рысканье и уменьшает затраты на управление. При отсутствии помех ( $\text{std}=0$ ) параметр  $S_{\text{крит}}$  не влияет на  $S_{\text{ев}}^2$ .

Для процедуры адаптации шага с квадратичным экстраполятором (*Adapt2*), с использованием РМНК (*Adapt3*) и (*Adapt4*) поверхности функций  $S_{\text{ев}}^2$  имеют схожий вид.

Для экстремального ПИ-регулятора (*Adapt5*) поверхности функции  $S_{\text{ев}}^2$  представлены на рис. 10–13.

Согласно рис. 10 и 11 области эффективных значений параметров  $\{d_0, d_1\}$  определяют «плато», в том числе в условиях помех. На этом «плато» система не критична к соотношению

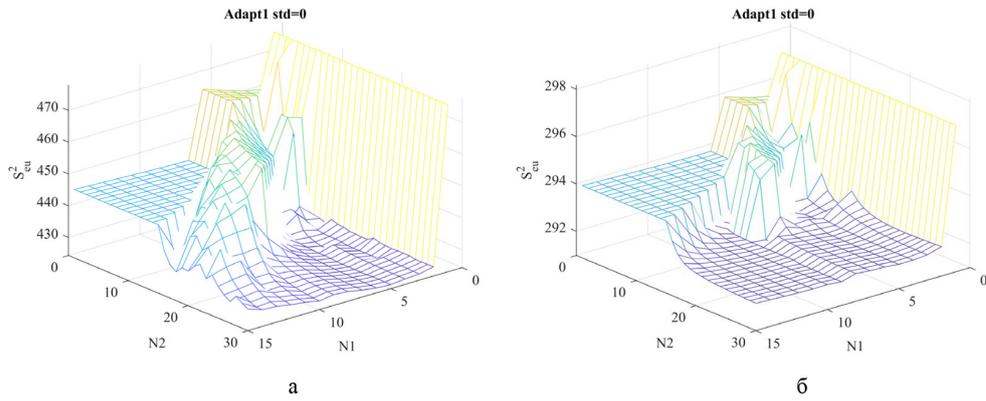


Рис. 6. Поверхность критерия  $S_{en}^2$  от  $\{N_1, N_2\}$  при  $\sigma_V = 0$  для: а) – кусочно-линейной модели; б) – квадратичной модели

Fig. 6. Criterion  $S_{en}^2$  surface vs  $\{N_1, N_2\}$  at  $\sigma_V = 0$  for: a) piecewise-linear model; б) quadratic model

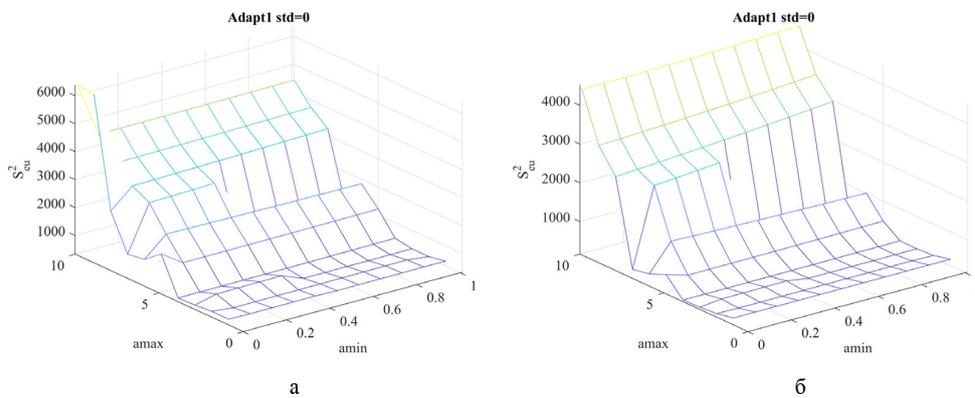


Рис. 7. Поверхность критерия  $S_{en}^2$  от  $\{a_{min}, a_{max}\}$  при  $\sigma_V = 0$  для: а) – кусочно-линейной модели; б) – квадратичной модели

Fig. 7. Criterion  $S_{en}^2$  surface vs  $\{a_{min}, a_{max}\}$  at  $\sigma_V = 0$  for: a) piecewise-linear model; б) quadratic model

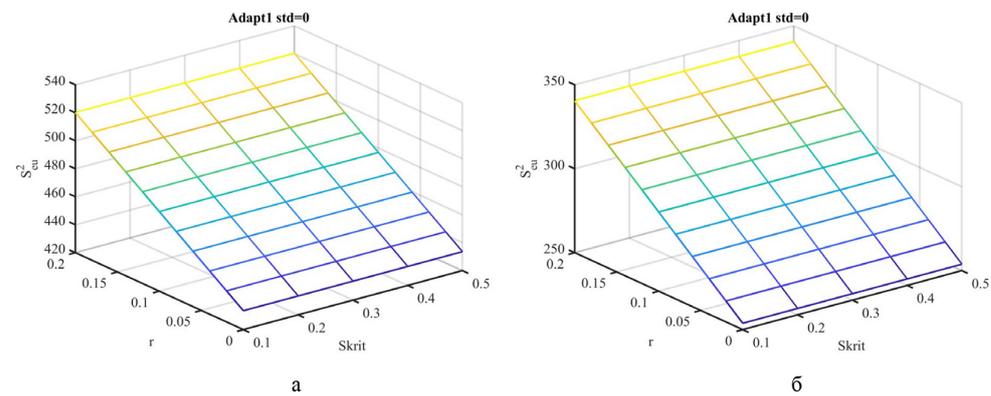


Рис. 8. Поверхность критерия  $S_{en}^2$  от  $\{S_{крит}, r\}$  при  $\sigma_V = 0$  для: а) – кусочно-линейной модели; б) – квадратичной модели

Fig. 8. Criterion  $S_{en}^2$  surface vs  $\{S_{крит}, r\}$  at  $\sigma_V = 0$  for: a) piecewise-linear model; б) quadratic model

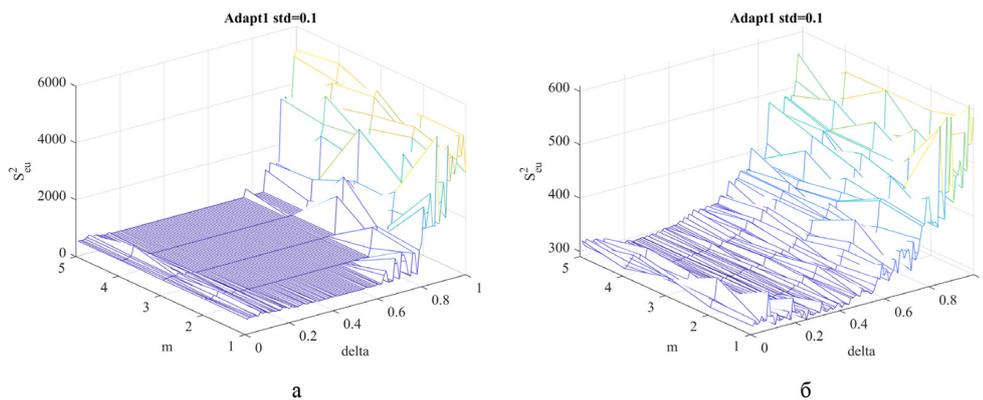


Fig. 9. Поверхность критерия  $S_{en}^2$  от  $\{\delta, m\}$  при  $\sigma_v = 0$  для: а) – кусочно-линейной модели; б) – квадратичной модели

Fig. 9. Criterion  $S_{en}^2$  surface vs  $\{\delta, m\}$  at  $\sigma_v = 0$  for: a) piecewise-linear model; б) quadratic model

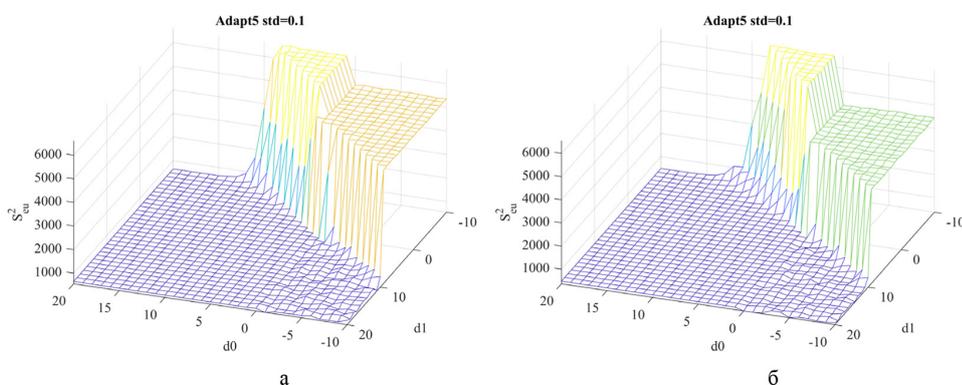


Рис. 10. Поверхность критерия  $S_{en}^2$  от  $\{d_0, d_1\}$  при  $\sigma_v = 0.1$  для: а) – кусочно-линейной модели; б) – квадратичной модели

Fig. 10. Criterion  $S_{en}^2$  surface vs.  $\{d_0, d_1\}$  at  $\sigma_v = 0.1$  for: a) piecewise-linear model; б) quadratic model

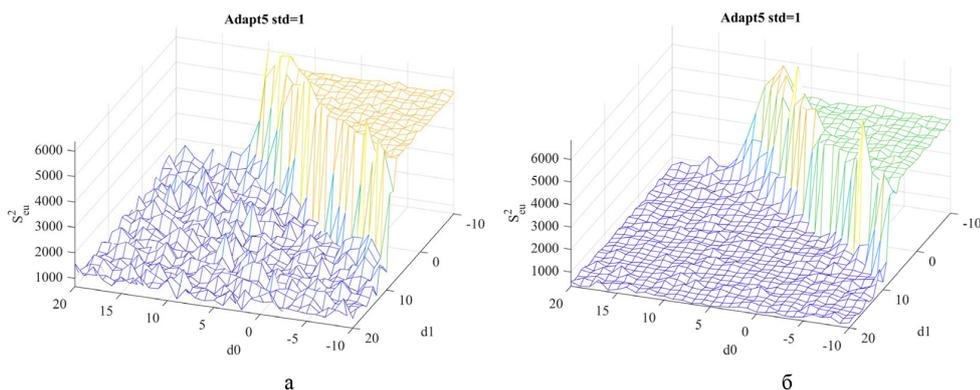


Рис. 11. Поверхность критерия  $S_{en}^2$  от  $\{d_0, d_1\}$  при  $\sigma_v = 1$  для: а) – кусочно-линейной модели; б) – квадратичной модели

Fig. 11. Criterion  $S_{en}^2$  surface vs.  $\{d_0, d_1\}$  at  $\sigma_v = 1$  for: a) piecewise-linear model; б) quadratic model

параметров  $\{d_0, d_1\}$  в пределах допустимой области. Отметим, что допустимые области изменения параметров классического ПИ-регулятора и экстремального существенно отличаются.

Влияние параметров рабочего шага (рис. 12) отражает рост потерь на поиск при росте  $a_{\max}$  для кусочно-линейной модели, и незначительно влияние  $a_{\min}$  и  $a_{\max}$  для квадратичной модели. Влияние штрафа  $r$  на управление (рис. 13) на функцию  $S_{eu}^2$  существенно для обеих моделей и подтверждает, что чем больше  $r$ , тем меньше изменение  $u(k)$ , тем больше ошибка  $e(k)$ . Влияние же числа повторных измерений при малом уровне помех незначительно.

Полученные рисунки позволяют определить зависимость интегрального критерия эффективности управления  $S_{eu}^2$  от параметров регулятора, выделить недопустимые зоны параметров и степень их влияния.

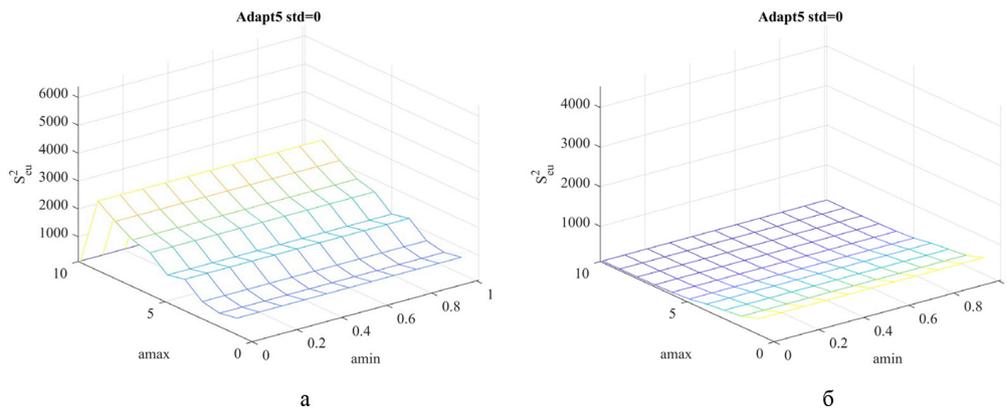


Рис. 12. Поверхность критерия  $S_{eu}^2$  от  $\{a_{\min}, a_{\max}\}$  при  $\sigma_v = 0$  для: а) – кусочно-линейной модели; б) – квадратичной модели

Fig. 12. Criterion  $S_{eu}^2$  surface vs.  $\{a_{\min}, a_{\max}\}$  at  $\sigma_v = 0$  for: а) piecewise-linear model; б) quadratic model

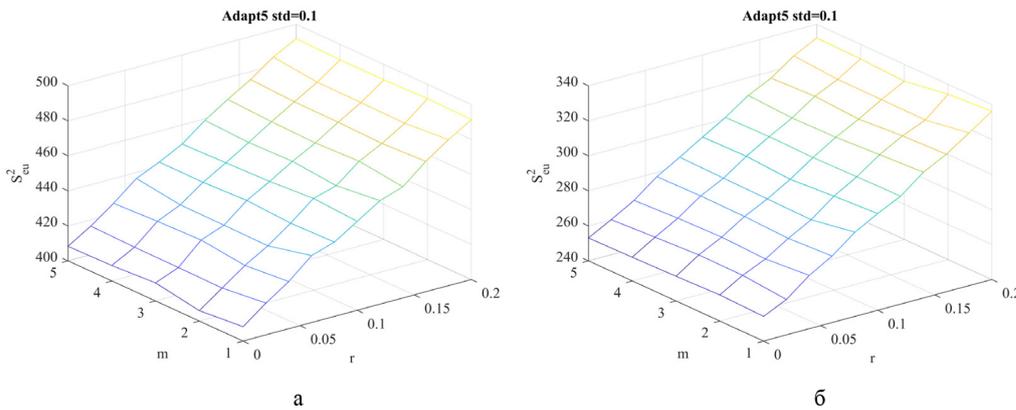


Рис. 13. Поверхность критерия  $S_{eu}^2$  от  $\{r, m\}$  при  $\sigma_v = 0.1$  для: а) – кусочно-линейной модели; б) – квадратичной модели

Рис. 13. Criterion  $S_{eu}^2$  surface vs.  $\{r, m\}$  at  $\sigma_v = 0.1$  for: а) piecewise-linear model; б) quadratic model

*Поиск оптимальных значений параметров регуляторов*

Поиск произведен по интегральным критериям  $S_{en}^2$  (4),  $J_c$  (5),  $J_{ke}$  (6). Качество процессов управления спроектированных оптимальных регуляторов оценивалось по критериям  $S_c$  (7),  $S_u$  (8). Для решения задачи (48) использован глобальный алгоритм нулевого порядка – генетический алгоритм. Оптимизация проведена на квадратичной модели (11) с исходными данными и параметрами при построении поверхностей функции  $S_{en}^2$  для уровня помех  $\sigma_v = 1$ . Результаты исследования приведены в табл. 3–5.

Исследование проводилось на квадратичной модели, в которой соотношение уровня полезного сигнала  $A(k)$  к уровню помех  $\sigma_v$  равно

$$\frac{A(k)}{\sigma_v} = \frac{|2K_2 \cdot (u(k) - u^*(k)) \cdot a(k)|}{\sigma_v} \quad (50)$$

или

$$\frac{A(k)}{\sigma_v} = \frac{|2 \cdot 0.1 \cdot a(k) \cdot (u(k) - 10)|}{1} = 0.2 \cdot |a(k) \cdot (u(k) - 10)|.$$

Таблица 1. Параметры для исследования адаптивных алгоритмов Adapt1÷Adapt4

Table 1. Parameters for the study of adaptive algorithms Adapt1÷Adapt4

Параметр	Базовые значения	Ограничения
$N_1$	1	$1 \leq N_1 \leq 15$
$N_2$	1	$1 \leq N_2 \leq 30$
$a_{\min}$	0.1	$0.01 \leq a_{\min} \leq 1$
$a_{\max}$	1	$1 \leq a_{\max} \leq 30$
$\delta$	0.01	$0.01 \leq \delta \leq 1$
$m$	2	$1 \leq m \leq 5$
$S_{\text{крит}}$	0.3	$0.1 \leq S_{\text{крит}} \leq 0.5$
$r$	0.1	$0 \leq r \leq 0.2$

Таблица 2. Параметры для исследования экстремального ПИ-регулятора (Adapt5)

Table 2. Parameters for the study of the extremal PI-controller (Adapt5)

Параметр	Базовые значения	Ограничения
$a_{\min}$	0.1	$0.01 \leq a_{\min} \leq 1$
$a_{\max}$	1	$1 \leq a_{\max} \leq 10$
$m$	2	$1 \leq m \leq 5$
$S_{\text{крит}}$	0.3	$0.1 \leq S_{\text{крит}} \leq 0.5$
$r$	0.1	$0 \leq r \leq 0.2$
$d_0$	1	$-10 \leq d_0 \leq 20$
$d_1$	1	$-10 \leq d_1 \leq 20$

Таблица 3. Оптимальные по  $S_{eu}^2$  значения параметров регуляторовTable 3.  $S_{eu}^2$ -optimal parameter values of the regulators

Параметр	Adapt1	Adapt2	Adapt3	Adapt4	Adapt5
$N_1$	2	2	6	2	-
$N_2$	22	26	26	27	-
$a_{\min}$	0.24	0.57	0.32	0.56	0.12
$a_{\max}$	4.67	4.76	4.44	4.54	9.74
$\delta$	0.07	0.08	0.08	0.08	-
$S_{\text{крит}}$	0.39	0.32	0.46	0.31	0.20
$m$	2	5	5	4	5
$r$	$8.2 \cdot 10^{-4}$	$42 \cdot 10^{-4}$	$47 \cdot 10^{-4}$	$22 \cdot 10^{-4}$	$35 \cdot 10^{-4}$
$d_0$	-	-	-	-	-7.65
$d_1$	-	-	-	-	-5.44

Таблица 4. Оптимальные по  $J_e$  значения параметров регуляторовTable 4.  $J_e$ -optimal parameter values of the regulators

Параметр	Adapt1	Adapt2	Adapt3	Adapt4	Adapt5
$N_1$	2	2	2	3	-
$N_2$	30	25	25	12	-
$a_{\min}$	0.27	0.15	0.19	0.37	0.02
$a_{\max}$	4.35	4.01	4.18	4.37	9.88
$\delta$	0.06	0.03	0.05	0.05	-
$S_{\text{крит}}$	0.46	0.27	0.17	0.33	0.32
$m$	5	3	5	5	5
$r$	-	-	-	-	-
$d_0$	-	-	-	-	-0.47
$d_1$	-	-	-	-	-8.84

Критерии эффективности (4), (5), (6) отражают потери на поиск при движении к экстремуму и в области экстремума (потери на рысканье [2]). Согласно (50) доля потерь на поиск выше потерь на рысканье. Для их уменьшения необходимо быстро достичь области экстремума и быстро уменьшить рабочий шаг  $a_{\max}$  до  $a_{\min}$ . Полученные соотношения  $a_{\min}$ ,  $a_{\max}$  и  $N_1$ ,  $N_2$  отражают эту стратегию.

Уровень пороговой фильтрации  $\delta$ , критическое среднее смещение к цели  $S_{\text{крит}}$  синхронизируются с уровнем полезного сигнала в области экстремума и минимизируют потери на рысканье.

Влияние штрафа  $r$  в критерии (4) оказалось не столь значительным по причине быстрого перехода в область экстремума (1–2 шага).

Для сравнения эффективности полученных оптимальных параметров регуляторов (табл. 3–5) между собой с базовыми значениями (табл. 1–2) выбрана квадратичная модель и условия при поиске оптимальных параметров регуляторов.

Таблица 5. Оптимальные по  $J_{ке}$  значения параметров регуляторовTable 5.  $J_{ке}$ -optimal parameter values of the regulators

Параметр	Adapt1	Adapt2	Adapt3	Adapt4	Adapt5
$N_1$	5	2	2	3	-
$N_2$	29	28	28	22	-
$a_{\min}$	0.21	0.26	0.47	0.39	0.04
$a_{\max}$	4.61	4.64	4.29	4.37	9.93
$\delta$	0.04	0.08	0.09	0.07	-
$S_{\text{крит}}$	0.25	0.29	0.39	0.19	0.49
$m$	5	5	4	5	5
$r$	-	-	-	-	-
$d_0$	-	-	-	-	-5.73
$d_1$	-	-	-	-	-8.43

Поскольку эксперименты проводились в условиях помех, то сравнение качества процессов управления проводилось по среднему значению критериев (7)  $S_e$  и (8)  $S_u$  для серии испытаний  $L = 100$ .

$$\overline{S_e} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L S_{e,i} \quad (51)$$

$$\overline{S_u} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L S_{u,i} \quad (52)$$

На рис. 14 и 15 видно, что оптимальные параметры значительно улучшают качество процессов управления у всех регуляторов по критериям  $\overline{S_e}$  и  $\overline{S_u}$  по сравнению с базовыми параметрами. По результатам оптимизации наилучший результат показал экстремальный ПИ-регулятор (Adapt5).

В целом критерии (51), (52) схожи по влиянию базовых и оптимальных параметров на качество процессов управления. Конечно, если выбрать другие базовые параметры, различие можно уменьшить, но их сложно подобрать в 6-мерном пространстве параметров на интуитивном уровне.

Различия между оптимальными адаптивными регуляторами обусловлено их структурой. Так, Adapt1 и Adapt3 ориентированы на линейную аппроксимацию целевой функции, а Adapt2 и Adapt4 на квадратичную аппроксимацию на каждом шаге поиска.

Экстремальный ПИ-регулятор (Adapt5) наилучший по критерию  $J_{ке}$  в обоих случаях. Влияние уровня помех на качество процессов управления для оптимальных регуляторов по критерию (51) на квадратичной модели (11) приведено на рис. 16–18.

На рисунках видно, что минимальные значения критерия (51) имеет экстремальный ПИ-регулятор (Adapt5) на всем диапазоне уровня помехи  $\sigma_v$ , для критериев эффективности  $S_{ев}^2$ ,  $J_e$ ,  $J_{ке}$ , а регуляторы с РМНК предпочтительнее экстраполяторов.

На рис. 19 показаны процессы управления для рассмотренных наборов параметров экстремального ПИ-регулятора при уровне помех  $\sigma_v = 1$  на квадратичной модели (11).

Параметры экстремального ПИ-регулятора по критерию  $J_e$  (см. рис. 19в) обеспечивают наилучшее качество процессов управления.

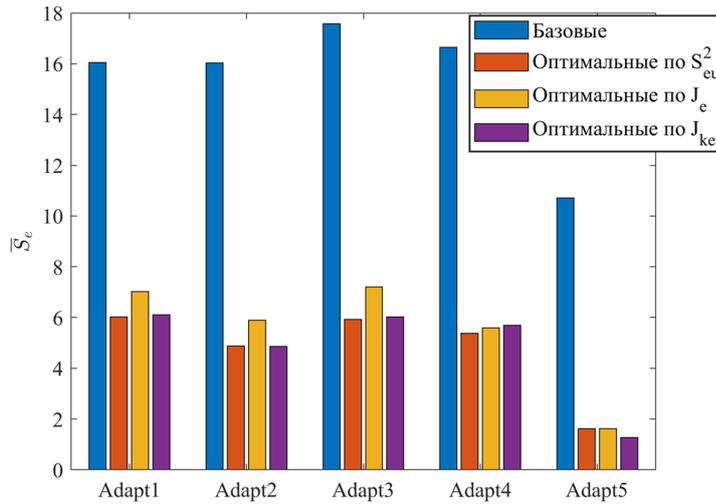


Рис. 14. Качество процессов управления для базовых и оптимальных параметров по критерию  $\overline{S}_e$

Fig. 14. The quality of control processes corresponding to the baseline and optimal parameters, as evaluated by the  $\overline{S}_e$  criterion

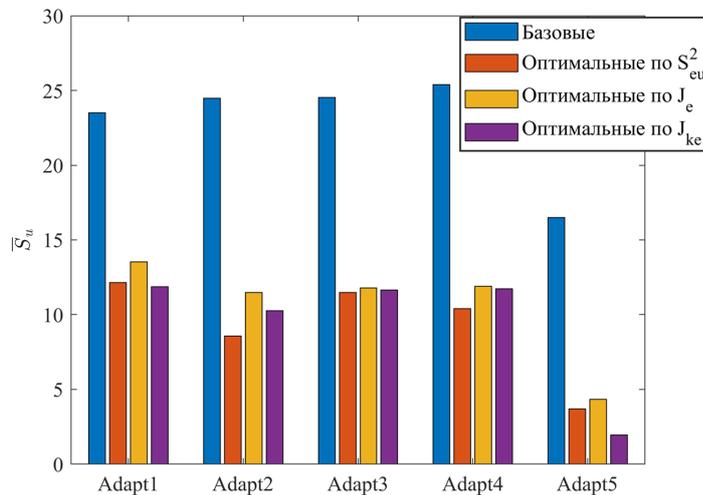


Рис. 15. Качество процессов управления для базовых и оптимальных параметров по критерию  $\overline{S}_u$

Fig. 15. The quality of control processes corresponding to the baseline and optimal parameters, as evaluated by the  $\overline{S}_u$  criterion

## Выводы

Предложенный в работе подход для синтеза параметров дискретных экстремальных регуляторов позволяет целенаправленно выбрать интегральные критерии эффективности в зависимости от свойств объекта управления и возможностей устройства управления как априори, так и в процессе управления. Система экстремального управления позволяет оценивать качество процессов управления. В совокупности она позволяет менять не только параметры регулятора, но и структуру регулятора из имеющегося набора, то есть «самоорганизации».

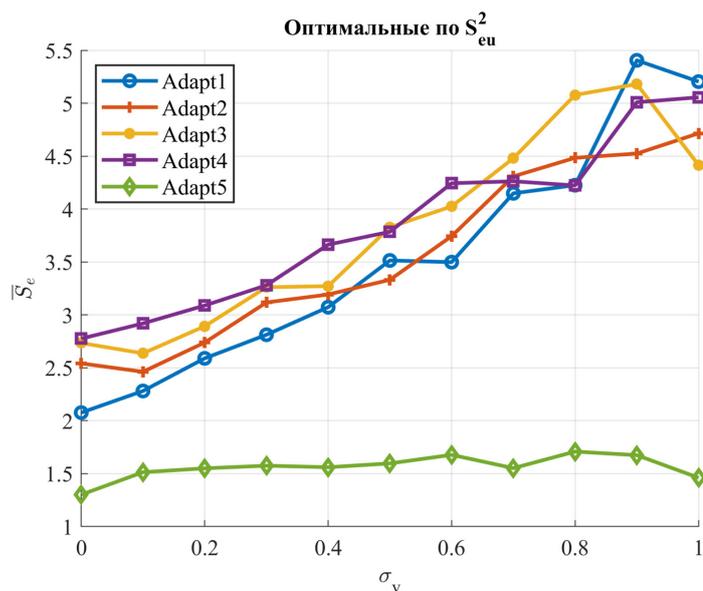


Рис. 16. Влияние уровня помех на качество процессов управления для оптимальных регуляторов по критерию  $S_{eu}^2$

Fig. 16. The influence of the noise level on the quality of control processes for regulators optimal in terms of the  $S_{eu}^2$  criterion

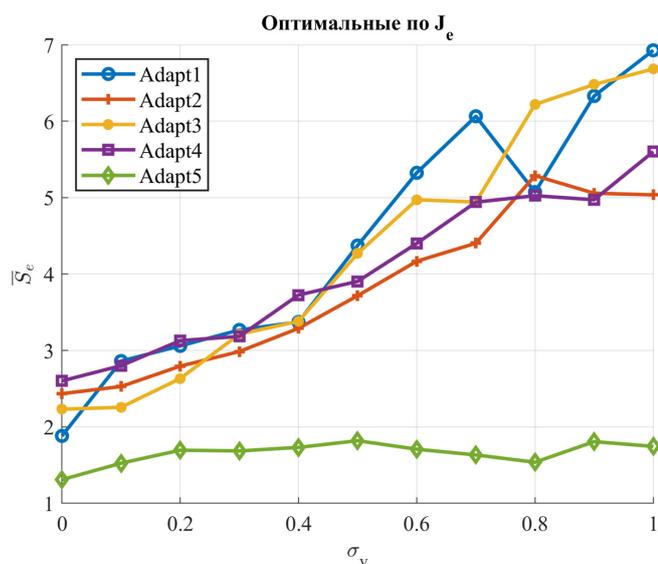


Рис. 17. Влияние уровня помех на качество процессов управления для оптимальных регуляторов по критерию  $J_e$

Fig. 17. The influence of the noise level on the quality of control processes for regulators optimal in terms of the  $J_e$  criterion

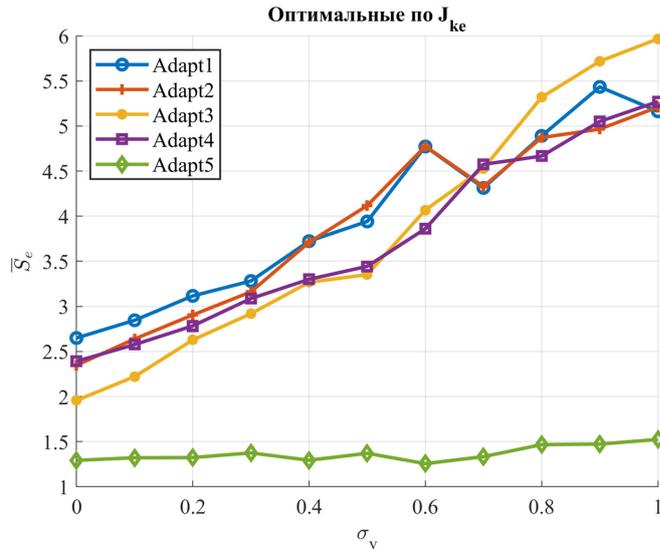


Рис. 18. Влияние уровня помех на качество процессов управления для оптимальных регуляторов по критерию  $J_{ke}$

Рис. 18. The influence of the noise level on the quality of control processes for regulators optimal in terms of the  $J_{ke}$  criterion

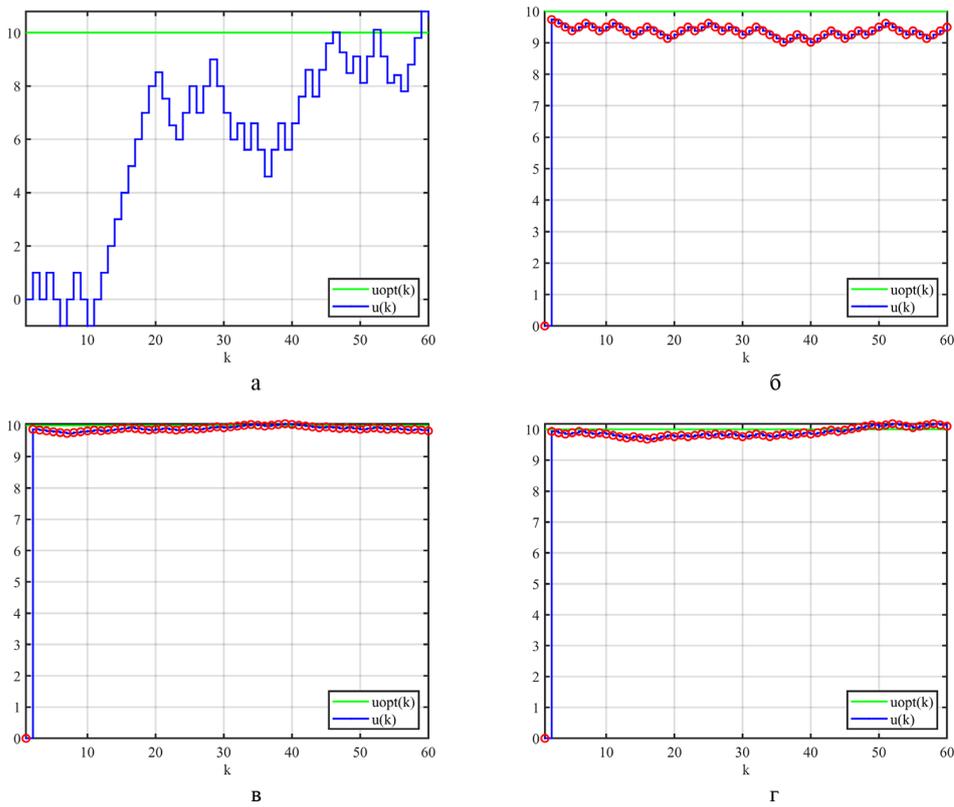


Рис. 19. Графики процесса управления для а) базовых параметров; б) оптимальных по  $S_{eu}^2$ ; в) оптимальных по  $J_e$ ; г) оптимальных по  $J_{ke}$

Fig. 19. Control process plots for: а) baseline parameters; б)  $S_{eu}^2$ -optimal; в)  $J_e$ -optimal; г)  $J_{ke}$ -optimal

Наиболее перспективным в задачах экстремального управления представляется экстремальный ПИ-регулятор. В работе найдены области эффективных значений его параметров  $d_0$ ,  $d_1$ , он прост в реализации и обеспечивает высокое качество процессов управления, в том числе в условиях помех.

### Список литературы / References

- [1] Либерзон Л.Н., Родов А.Б. *Системы экстремального регулирования* / Под ред. проф. В.В. Казакевича. М., Энергия, 1965. [Liberzon L.N., Rodov A.B. *Extreme Regulation Systems* ed. by prof. V.V. Kazakevich. M., Energiya, 1965 (in Russian)]
- [1] Растринин Л.А. *Системы экстремального управления*. М., Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1974. [Rastrigin L.A. *Extreme Control Systems*. M., Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1974 (in Russian)]
- [2] Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. *Справочник по теории автоматического управления*. М., Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 712 [Handbook on the Theory of Automatic Control ed. by A. A. Krasovskii. M., Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1987, 712 (in Russian)]
- [3] Изерман Р. *Цифровые системы управления*: Пер. с англ. М., Мир, 1984. [Isermann R. *Digital Control Systems*. M., Mir, 1984 (in Russian)]
- [4] Zhang C., Ordóñez R. Extremum-seeking control and applications: a numerical optimization-based approach. *Springer Science & Business Media*, 2011.
- [5] Hunnekens B. et al. Extremum-seeking control for the adaptive design of variable gain controllers. *IEEE Transactions on control systems technology*, 2014, 23(3), 1041–1051.
- [6] Frantsuzova G.A. Extremum Seeking System with PID controller for Second-Order Non-Stationary Plant. *2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, IEEE, 2020, 1–5.
- [7] Teel A.R., Popovic D. Solving smooth and nonsmooth multivariable extremum seeking problems by the methods of nonlinear programming. *Proceedings of the 2001 American Control Conference. (Cat. No. 01CH37148)*, IEEE, 2001, 3, 2394–2399.
- [8] Khong S.Z. et al. Unified frameworks for sampled-data extremum seeking control: Global optimisation and multi-unit systems. *Automatica*, 2013, 49(9), 2720–2733.
- [9] Killingsworth N.J., Krstic M. PID tuning using extremum seeking: online, model-free performance optimization. *IEEE control systems magazine*, 2006, 26(1), 70–79.
- [10] Wang Z., Zhou X., Wang J. Extremum-seeking-based adaptive model-free control and its application to automated vehicle path tracking. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27(5), 3874–3884.
- [11] Zhang Y. Stability and performance tradeoff with discrete time triangular search minimum seeking. *Proceedings of the 2000 American Control Conference. ACC (IEEE Cat. No. 00CH36334)*, IEEE, 2000, 1(6), 423–427.
- [12] Zhang C., Ordóñez R. Numerical optimization-based extremum seeking control of LTI systems. *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*, IEEE, 2005, 4428–4433.
- [13] Armijo L. Minimization of functions having Lipschitz continuous first partial derivatives. *Pacific Journal of mathematics*, 1966, 16(1), 1–3.

**Information and  
Communication  
Technologies**

**Информационно-  
коммуникационные  
технологии**



EDN: EKJWHR

УДК 623.373

## **Raman Optical Amplifier: US Patents**

**Muhanned AL-Rawi\***

*Bandung Institute of Technology  
Bandung, Indonesia*

Received 16.05.2025, received in revised form 21.09.2025, accepted 30.09.2025

**Abstract.** The effect of stimulated Raman scattering in a Raman gain medium produces an optical amplifier based on Raman gain, known as a Raman amplifier. Although it can also be a bulk crystal, a waveguide in a photonic integrated circuit, or a cell with a gas or liquid medium, that medium is typically an optical fiber (perhaps a highly nonlinear fiber). When an input signal co-or counterpropagates with a pump beam, whose wavelength is usually a few tens of nanometers shorter, it can be amplified. In conclusion, this paper underscores the importance of understanding and harnessing the principles of Raman amplification in various dynamic optical landscapes. Also, the paper concisely presents US patents related to Raman amplifier.

**Keywords:** Raman amplifier, development, applications.

Citation: Muhanned AL-Rawi. Raman Optical Amplifier: US Patents. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(8), 1124–1130. EDN: EKJWHR



## **Оптический усилитель Рамана: патенты США**

**Муханнед Аль-Раби**

*Бандунгский технологический институт  
Индонезия, Бандунг*

**Аннотация.** Эффект вынужденного комбинационного рассеяния в среде с рамановским усилением создаёт оптический усилитель, основанный на рамановском усилении, известный как рамановский усилитель. Хотя это может быть также объёмный кристалл, волновод в фотонной интегральной схеме или ячейка с газовой или жидкой средой, такой средой обычно является оптическое

© 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

волокно (возможно, высоко нелинейное волокно). Когда входной сигнал распространяется в одном или противоположном направлении с пучком накачки, длина волны которого обычно на несколько десятков нанометров короче, он может быть усилен. В заключение в данной статье подчёркивается важность понимания и использования принципов рамановского усиления в различных динамических оптических системах. Также в статье кратко представлены патенты США, связанные с рамановским усилителем.

**Ключевые слова:** рамановский усилитель, разработка, применение.

Цитирование: Муханнед Аль-Раби. Оптический усилитель Рамана: патенты США / Муханнед Аль-Раби // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(8). С. 1124–1130. EDN: EKJWHR

## 1. Introduction

In long-distance systems, Raman amplification is an alternative amplification method that is increasingly being employed. In contrast to the Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA), the Raman amplifier is a distributed amplification system. Fig. 1 shows a schematic of the transmission line's power profile and Raman amplifier.

The Raman amplifier uses stimulated Raman scattering (SRS) in the fiber to transform the energy of higher-frequency pump signals into lower-frequency signals. The signal is amplified via the transmission fiber by the distributed Raman amplifier. As illustrated in Fig. 1. The typical configuration is a backward pump scheme, which would produce less noise. Because of its wide gain bandwidth and low noise characteristic, Raman amplification is highly desirable for long-distance systems. The Raman amplifier is the only choice in some situations, such as when a broad bandwidth or span is required. Compared to the EDFA, this amplifier requires more power. In practice, a Raman amplifier with high gain and flatness is achieved by using multiple pump lasers. By combining two pump lasers with the same center frequency, a polarization multiplexer can double pump power and reduce the polarization dependency of Raman gain. Another common technique is to use a wavelength-division multiplexing (WDM) coupler to combine two or three pump lasers with different center frequencies. Changing to a different wavelength can boost pump power and channel capacity. A Raman amplifier's ratio of these pump powers can be changed to produce this flat gain. For each laser to function at its peak, the pump power must be modified according to the spectrum of the received signal.

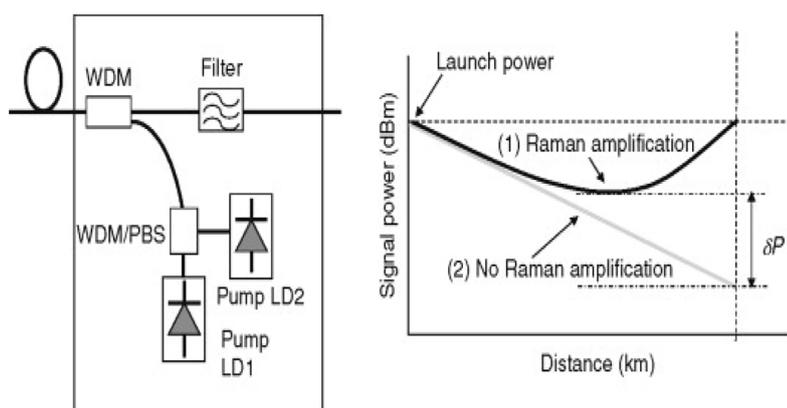


Fig. 1. Raman amplifier

### *1.1. Applications of Raman Amplifier*

Applications for Raman amplifiers can be found in many different industries, such as data centers, telecommunications, and underwater cable systems. They are important for transmitting data over thousands of kilometers in long-haul optical communication networks. Raman amplification is used by underwater fiber optic cables to preserve signal integrity over extended underwater distances. They support cloud computing and content delivery networks by ensuring high-speed data transmission within data centers. In research applications and scientific experiments where accuracy and signal integrity are crucial, Raman amplification is also employed.

### *1.2. Raman Amplifier Limitations*

Raman amplifiers have certain restrictions as well. Among their primary drawbacks is the need for high pump powers in order to achieve appreciable signal amplification. In certain applications with limited power availability, this could be an issue. The performance of Raman amplifiers may also be restricted by noise and other nonlinear effects. Notwithstanding these drawbacks, Raman amplifiers are a significant and potent technological advancement in the field of optical communications.

## **2. US Patents**

In [1], a proposed amplifier unit for a Wavelength-Division Multiplex Transmission System is introduced, consisting of a primary optical amplifier, a secondary optical amplifier, and an interconnecting element between the amplifiers. The amplifier unit incorporates a fiber segment constructed from Dispersion-Compensating Fiber, which is illuminated by at least one pump light source and functions as a Raman amplifier. The optical amplification of the Dispersion-Compensating Fiber surpasses the loss in the interconnecting element between the amplifiers.

An optical fiber Raman amplifier is used in [2] to enable the addition of a pump laser and to lessen signal degradation brought on by a change in gain that takes place during and after the pump laser source add-on procedure. The following is how the above method is accomplished. A wavelength multiplexer 110 has add-on ports 114–1 and 114–2 that allow for the addition of new wavelength pump laser sources. The pre-installed Raman pump lasers 111–1 and 111–2's output intensities change when an add-on pump laser source 112 is turned on; as a result, the intensity of each signal laser in each pre-installed band remains constant before and after the add-on. Transient gain changes in the pre-installed bands are avoided by changing the output intensity of each pump laser source that alters the output, for instance, during the add-on in a linear fashion over time.

An optical transmission system that can keep an eye on the performance of Raman-amplifier repeaters even in the event that a fiber failure partially disrupts an optical transmission line is described in [3]. In order to request that a specific repeater report its operational status, an end station sends a monitoring command signal along with a response carrier wave to be used in that reporting. The repeater's upstream wavelength selector reflects back the response carrier wave while selectively passing the monitoring command signal using their various wavelengths. A monitoring controller generates a response message with operating status data in response to the command. In order for the response message to be superimposed on the response carrier wave propagating on the upstream link, an excitation unit uses a pump beam modulated by a modulation controller to perform Raman amplification. After

passing via a downstream optical coupler and the upstream wavelength selector, the monitoring response signal is returned to the requesting end station.

An optical transmission system employing a Raman amplifier that can suppress the rise in Message Passing Interface (MPI) and improve the amplification efficiency of signal light is presented in [4]. The Raman amplifier consists of a forward pumping source 21 and a backward pumping source 22, as well as an optical fiber 10 with a reflection point at least at first point 11 or second point 12. The conditions for supplying pumping light in sources 21 and 22 are designed based on the location of the reflection point and its reflection factor in the optical fiber. These conditions include whether to provide forward and backward pumping light as well as the power distribution between forward and backward pumping light.

A technique, device, and system for managing power transients in a Raman-amplified optical transmission system is described in [5]. It involves adjusting the gain of at least one dispersion compensating module (DCM) in the Raman-amplified optical transmission system to compensate for a change in signal power brought on by the power transient when it is detected in an optical signal.

An optical transmission system with a structure that permits signal transmission while preserving superior transmission characteristics across a wider wavelength band is the subject of the invention in [6]. After being Raman-amplified by a lumped Raman amplifier, signal light with a positive chirp is output from a signal light source and travels to an optical receiver via a transmission line fiber. A high-nonlinearity fiber with a negative chromatic dispersion at the signal light's wavelength and purposefully producing a self-phase modulation within it is used as a Raman amplification fiber in the lumped Raman amplifier. Both the self-phase modulation and the negative chromatic dispersion produced in the high-nonlinearity fiber efficiently offset the positive chirp of the signal light traveling through the fiber.

An optical fiber for Raman amplification uses a pumping light to amplify a signal light in [7]. At a wavelength of 1,550 nm, a chromatic dispersion falls between  $-70$  ps/nm/km and  $-30$  ps/nm/km. With a pumping light of 1,450 nm, the Raman gain efficiency is at least 5 (W. times. km). sup.1. At 1,550 nm, the nonlinear coefficient is equal to or less than 5.0.times.10.sup.-9 W.sup.-1. The zero-dispersion wavelength is not at the pumping light's wavelength or the signal light's wavelength. The cut-off wavelength is either the same as or less than the pumping light's wavelength.

In[8], by using a variety of photodetectors with varying wavelength-sensitivity characteristics, an apparatus, method, and computer program product controls the pumping light powers for a multiple-wavelength-pumped Raman amplifier that is pumped by pumping lights from multiple pumping light sources. This is done by measuring the gain wavelength characteristic or the signal-power wavelength characteristic of the multiple-wavelength-pumped Raman amplifier. A determining unit in the device calculates the estimated power of each signal channel in a wavelength band for use based on values tracked by the photodetectors. The estimated power of each signal channel is then used to calculate the pumping light powers. By interpolating the values that the photodetectors are monitoring, the determining unit calculates the power of each signal channel.

Within the algorithm presented in [9], a method is outlined that involves the collection of power measurements across various optical channels. Measured deviations, representing the differences between the power measurements and the corresponding power targets for each optical channel, are generated. From these deviation measurements, the correctable deviations for each optical channel

are identified. This is achieved by projecting the measured deviations into a space that details the achievable Raman gain profiles using a specific combination of channels and pumps. Consequently, the most effective pump settings for a set of pumps are established by solving an optimization problem using the identified correctable deviations for each optical channel. The resulting pump settings can then be implemented on the specified pumps.

In [10], a Raman amplifier made up of two linearly arranged Raman resonators receives a zeroth-order Stokes wavelength signal at 1066 nm and a third-order Stokes wavelength seed signal at the intended output wavelength of 1240 nm. In addition to producing the third-order Stokes wavelength seed signal at 1240 nm, the first resonator transforms the zeroth-order Stokes wavelength signal at 1066 nm into a first-order Stokes wavelength signal at 1118 nm. The power level of the 1240 nm seed signal is then increased by the second resonator, which transforms the first resonator's 1118 nm output into a second-order Stokes wavelength signal at 1176 nm. A photosensitive Raman fiber connects to multiple high-reflector Bragg gratings in each Raman resonator. By offsetting the corresponding center wavelengths of the high-reflector Bragg gratings, the second Raman resonator's resonant bandwidth can be adjusted to control the linewidths of the second and third Stokes orders.

Fabry-Perot, DFB, or DBR semiconductor lasers or MOPAs are used in [11] to create a Raman amplifier that produces pumping lights with varying central wavelengths, with a distance between adjacent central wavelengths greater than 6 nm and less than 35 nm. The Raman amplifier adapts an optical repeater to compensate for loss in an optical fiber transmission line. A Raman amplification technique in which the pumping light's light power increases with its shorter central wavelength. Pumping lights with wavelengths corresponding to the first to n-th channels are multiplexed, and pumping lights with wavelengths separated from the n-th channel by 2 THz or more toward the longer wavelength side are combined with the multiplexed light to form the pumping light source. In the Raman amplifier, a specific pumping 1 wavelength is the first channel, and the second to n-th channels are arranged with an interval of approximately 1 THz toward a longer wavelength side.

An optical module is used in [12] to amplify Wavelength Division Multiplexing (WDM) channels transmitted on a fiber using a Raman amplifier. An optical time domain reflectometer (OTDR) is used to transmit an OTDR signal on the fiber and detect a back-scattered signal based on it in order to test the fiber. The wavelength of the OTDR signal must be one of two things: i) between one or more wavelengths associated with the Raman amplifier and one or more wavelengths associated with the WDM channels, and ii) greater than one or more wavelengths associated with the WDM channels for the OTDR to operate in-service.

A reconfigurable optical add/drop multiplexer (ROADM) made up of several interconnected ROADM blocks is shown in [13]. An output power detector connected to one of the ingress switchable gain amplifier's outputs, a wavelength-selective switch connected to the ingress switchable gain amplifier's output, and an ingress switchable-gain amplifier (Raman amplifier) are all included in each ROADM block. Each ROADM block has multiple add/drop blocks connected to the various ROADM blocks' wavelength-selective switches. The output power detector provides an indication of the output signal power, which the controller in the ROADM is set up to receive. The controller then uses this information to modify the gain and equalization parameters of the ingress switchable-gain amplifier.

A controller for a front-exciting Raman-amplifier that amplifies an optical signal transmitted from one end of an optical fiber to the other end by inputting an excitation light to one end is described in

[14]. The controller contains a memory and a processor that is connected to the memory and set up to gather communication-related information about the communication of the optical signal in the optical fiber. If the information obtained about the communication of the optical signal does not show that the optical signal was communicated, the Raman gain of the front-exciting Raman amplifier is set based on the first light intensity of an amplified spontaneous scattered light of the excitation light. If the information obtained about the communication of the optical signal indicates that the communication of the optical signal occurred, the Raman gain is set based on a second light intensity of the optical signal output from the optical fiber.

An optical node with an Optical Add-Drop Multiplexer (OADM) multiplexer that includes a channel holder source, a Raman amplifier connected to the OADM multiplexer and to a fiber span, an Optical Channel Monitor (OCM) set up to monitor the optical spectrum before and after the Raman amplifier, and a controller set up to gather information about the fiber span, including measurements from the OCM, determine the channel holder source settings required to meet a target launch power profile for the fiber span, and configure the channel holder source based on the identified settings are all examples of automatic optical link calibration systems and methods in [15].

One or more processors and memory storing instructions are part of a management system (including a Raman amplifier) for an optical line system in [16]. When the instructions are executed, the processors receive State of Polarization (SOP) measurements from one or more optical components in the optical line system. The SOP measurements are taken while traffic-bearing channels are operating, and the processors use the SOP measurements to monitor the health of one or more fibers. SOP transients may be detected and/or located as part of the health.

### 3. Summary

This study focused on optical amplifiers, and more especially, Raman optical amplifiers, which are among the most significant and intricate technologies in the field of optical communication systems. The nature of this technology was described in the paper. Additionally, the article provided a brief overview of some US patents on the technology in question.

### References

- [1] Desthieux Bertrand et al. *Amplifier unit for a wavelength-division multiplex transmission system and also a method for amplifying optical signals*, US-Patent-20020034357-A1, 2002.
- [2] Kikuchi Nobuhiko et al. *Band-expanding method for optical amplifiers and optical transmission apparatus*, US US-Patent-20020145796-A1, 2002.
- [3] Fujiwara Haruo. *Optical transmission system*, US-Patent-20030011855-A1, 2003.
- [4] Inoue Masayuki. *Raman amplifier, optical transmission system using such amplifier and pumping light source therefore*, US-Patent-20030169480-A1, 2003.
- [5] Denkin Nathan Myron et al. *Method, apparatus and system for controlling power transients in a Raman-amplified optical transmission system*, US-Patent-20040091205-A1, 2004.
- [6] Miyamoto Toshiyuki et al. *Optical transmission system*, US-Patent- 20040246566-A1, 2004.
- [7] T7440167aniguchi; Yuki et al. *Optical fiber for Raman amplification, optical fiber coil, Raman amplifier, and optical communication system*, US-Patent-20060126162-B 2, 2008.

- [8] Fujimura, Koji et al. *Method and apparatus for controlling multiple-wavelength-pumped Raman amplifier and computer product*, US-Patent-7535629-B 2, 2009.
- [9] Christopher Alan. *System and method of Raman amplifier pump control*, US-Patent-8441721-B 2, 2013.
- [10] Henry J. et.al. *Seeded Raman amplifier in a linear configuration for generating a 1240 nm laser*, US-Patent-US 9502855-B 1, 2016.
- [11] Youichi Akasaka et.al. *Raman amplifier, optical repeater, and Raman amplification method*, US-Patent-US 9281654-B 2, 2016.
- [12] Jean Archambault et.al. *Raman amplifier system and method with integrated optical time domain reflectometer*, US-Patent-10374704-B 2, 2018.
- [13] Vinayak Dangui et.al. *Open, modular, and scalable optical line system*, US-Patent-10574379B 2, 2020.
- [14] Shukunami, Norifumi et al. *Controller and control method for Raman amplifier*, US-Patent-20220045755-A1, 2022.
- [15] Choudhury A. et.al. *Automatic optical link calibration with channel holders*, US-Patent-11456814-B 2, 2022.
- [16] Yinqing P. et.al. *Integrated polarimeter in an optical line system*, US-Patent-11747208-B 2, 2023.

EDN: VOJUDC

УДК 519.718.2

## **Application of System Engineering Approach as a Method to Assess the Process of Coatings Functional Properties Formation**

**Marina A. Polyakova<sup>a\*</sup>,**  
**Eduard M. Golubchik<sup>a</sup> and Marina N. Samodurova<sup>b</sup>**

*<sup>a</sup>Nosov Magnitogorsk State Technical University  
Magnitogorsk, Russian Federation*

*<sup>b</sup>South Ural State University  
Chelyabinsk, Russian Federation*

Received 14.06.2025, received in revised form 21.09.2025, accepted 30.09.2025

**Abstract.** This paper examines the basic principles of systems engineering as a methodology that makes it possible to design technological processes to obtain products with the required functional properties. A distinctive feature of systems engineering is the analysis of the functioning system in its dynamic development. According to this approach, the technological process is considered to be a system which consists of a set of interconnected operations as a sequential transformation of the source material into the finished product. This makes it possible to take into consideration the state of the system during the definite period of time, which is the key factor to select technological modes that ensure the formation of the necessary functional properties. The paper proposes the mathematical description of the technological process as a set of nonvacuous sets, which makes it possible to describe the technological process as a system of functional relationships between separate elements. The application of the basic principles of systems engineering and the developed mathematical model is shown on the example of the cold gas-dynamic spraying process. Forming of the coating by this method occurs due to the impact of a high-speed flow of powder particles with the surface. The structural and functional diagram of the cold gas-dynamic spraying process has been constructed, which allows to establish the relationship between the input and output parameters of this process. The structural and functional diagram of the formation of functional properties of the coating by cold gas-dynamic spraying has been constructed, which reflects the mechanisms of interaction of the two-phase powder flow with a surface. As a result of the theoretical investigations, the system of relationships between the control parameters of cold gas-dynamic spraying and the functional properties of the obtained coating was established. This served as the basis for constructing analytical expressions to predict the formation of coating functional properties taking into consideration the characteristics of external input and control parameters of the process applied.

---

© 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: m.polyakova-64@mail.ru

**Keywords:** systems engineering, coating, functional property, cold spray, structural and functional diagram, input and output parameters.

**Acknowledgements.** The work was supported by the Russian Science Foundation and the Government of the Chelyabinsk Region, Project No. 23–19–20054, [https:// rscf.ru/en/project/23–19–20054/](https://rscf.ru/en/project/23–19–20054/).

Citation: Polyakova M. A., Golubchik E. M., Samodurova M. N. Application of System Engineering Approach as a Method to Assess the Process of Coatings Functional Properties Formation. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(8), 1131–1142. EDN: VOJUDC



## Использование системного инжиниринга как метода оценки процесса формирования функциональных свойств покрытий

М. А. Полякова<sup>а</sup>, Э. М. Голубчик<sup>а</sup>, М. Н. Самодурова<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Магнитогорский государственный технический университет  
им. Г. И. Носова

Российская Федерация, Магнитогорск

<sup>б</sup>Южно-Уральский государственный университет  
Российская Федерация, Челябинск

**Аннотация.** Рассмотрены основные положения системного инжиниринга как методологии, позволяющей проектировать технологические процессы получения изделий с требуемыми функциональными свойствами. Отличительной особенностью системного инжиниринга является рассмотрение функционирующей системы в ее динамическом развитии. Согласно данному подходу технологический процесс рассматривается как система, состоящая из совокупности взаимосвязанных операций, как последовательное преобразование исходного материала в готовый продукт. Это позволяет учитывать состояние системы в конкретный промежуток времени, что является ключевым фактором для выбора технологических режимов, обеспечивающих формирование необходимых функциональных свойств. В статье приведено математическое описание технологического процесса как совокупности непустых множеств, что позволяет описать технологический процесс как систему функциональных соотношений между отдельными элементами. Показано применение основных положений системного инжиниринга и разработанной математической модели на примере процесса холодного газодинамического напыления. Формирование покрытия при использовании данного метода происходит за счет соударения с поверхностью высокоскоростного потока порошковых частиц. Построена структурно-функциональная схема процесса холодного газодинамического напыления, которая позволяет установить взаимосвязь между входными и выходными параметрами данного процесса. Построена структурно-функциональная схема формирования функциональных свойств покрытия при холодном газодинамическом напылении, которая отражает механизмы взаимодействия двухфазной порошковой струи с поверхностью. В результате проведенных теоретических исследований установлена система взаимосвязей между управляющими параметрами холодного газодинамического напыления и функциональными свойствами получаемого покрытия. Это явилось основанием для построения аналитических выражений для прогнозирования формирования функциональных свойств покрытий с учетом особенностей внешнего воздействия и управляющих параметров процесса его нанесения.

**Ключевые слова:** системный инжиниринг, покрытие, функциональное свойство, холодное газодинамическое напыление, структурно-функциональная схема, входные и выходные параметры.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23–19–20054, <https://rscf.ru/project/23–19–20054/> и при поддержке Правительства Челябинской области.

Цитирование: Полякова М. А. Использование системного инжиниринга как метода оценки процесса формирования функциональных свойств покрытий / М. А. Полякова, Э. М. Голубчик, М. Н. Самодурова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(8). С. 1131–1142. EDN: VOJUDC

В последние годы получают развитие подходы, основанные на комплексном представлении технологического процесса как совокупности технологии обработки, используемого оборудования и инструментов, основных и вспомогательных материалов, а также других факторов, влияющих на формирование свойств и обеспечивающих качество конечного продукта. При этом под продуктом в самом широком смысле понимается не только тот или иной вид изделия, но также, например, различные виды обработки материалов, в результате которых происходит изменение их структуры и свойств, процессы нанесения покрытий, обеспечивающие получение необходимых функциональных свойств поверхности и др. При таком подходе к рассмотрению различных видов технологического воздействия на изделия и материалы эффективным методом оценки свойств и показателей качества является использование квалиметрии, которая в результате позволяет получать количественную информацию об уровне конкурентоспособности изделий различного назначения или технологического процесса [1]. Причём квалиметрия как наука подразумевает интегрирование комплекса разнородных факторов для оценки уровня качества изучаемого объекта. Это явилось основой для развития системных подходов в исследованиях в области технологических процессов получения функциональных материалов, процессов производства и обработки изделий различного назначения, нанесения покрытий и т.д. [2–4] С этой точки зрения реальный объект описывается как совокупность взаимодействующих компонентов. Такими компонентами могут выступать технологические аспекты производства (режимы обработки, характеристики оборудования) и внешняя среда (специальные требования потребителей к показателям качества и уровню свойств продукции, нормативная и техническая документация, контракты между производителем и потребителем и т.д.) [5, 6]. Кроме того, при изучении технологических процессов на системном уровне все большее распространение получает методология системного инжиниринга.

Системный инжиниринг в широком смысле рассматривается как комплексная методология разработки работоспособной технологической системы получения изделия с требуемыми функциональными свойствами, охватывающей все сопутствующие процессы производства [7–9]. При этом система должна быть направлена на удовлетворение потребностей потребителя на протяжении всего жизненного цикла продукции [10]. Таким образом, центральное место в системном инжиниринге технологического процесса занимает понятие «система и ее компоненты».

### Методы исследования

В общем виде под определением «система  $S$ » понимаются элементы некоторого множества  $a_i$  и связи между ними  $r_i$

$$S \equiv \text{def} \langle \{a_i\}, \{r_i\} \rangle, \quad (1)$$

где  $a_i \in A$ ,  $r_i \in R$ ,  $R$  подмножество декартова квадрата  $A$ .

При этом необходимо учитывать наличие системы целей  $Z$ , регулирующих функционирование системы. Тогда

$$S \equiv \text{def} \langle A, R, Z \rangle, \quad (2)$$

где  $A$  – множество элементов системы,  $R$  – множество отношений на  $A$ ,  $Z$  – множество целей.

В некоторых определениях системы уточняются условия целеобразования путём учёта лица, принимающего решение,  $N$  с точки зрения которого исследуется система в интервале времени  $\Delta T$ , в который наблюдается или исследуется данная система, т.е.

$$S \equiv \text{def} \langle A, R, Z, \Delta T, N \rangle. \quad (3)$$

Компонентами принято считать части системы, не обладающие по отдельности ее признаками.

Также значимым понятием в системном инжиниринге является понятие «связь». Оно характеризует одновременно и строение (статику), и функционирование (динамику) рассматриваемой системы.

Часто система представляется простым перечислением компонентов и связей между ними, что можно описать, используя модель «чёрного ящика» [11–15]. Представление системы в виде «чёрного ящика» предполагает рассмотрение технологического процесса как последовательности состояний от заготовки до готового изделия с установлением четко определенных связей между входными и выходными параметрами с помощью определенных функциональных или иных зависимостей [16, 17].

На основании вышеизложенного технологическую систему получения материалов с требуемыми функциональными свойствами можно представить в виде отношения на непустых множествах

$$S \subset \times \{V_i : i \in I\}, \quad (4)$$

где  $\times$  – символ декартова произведения,  $I$  – множество индексов. Отдельное множество  $V_i$  представляется объектом системы (отдельная операция обработки, элемент оборудования или его характеристика, свойство материала, показатель качества изделия и т.д.).

Пусть  $I_x \subset I$  и  $I_y \subset I$  причём  $I_x \cap I_y = \emptyset$  и  $I_x \cup I_y = I$ , т.е. множество индексов состоит из двух непересекающихся подмножеств индексов. Множество  $X = \times \{V_i : i \in I_x\}$  примем как входной параметр системы, а множество  $Y = \times \{V_i : i \in I_y\}$  будет означать ее выходной параметр. Тогда технологическая система как процесс получения материала с требуемыми свойствами будет определяться отношением

$$S \subset X \times Y. \quad (5)$$

Такая система соответствует принятому понятию «чёрный ящик» в технической литературе [18].

Для технологических процессов наибольший интерес представляют случаи, когда элемент входного объекта однозначно определяет элемент выходного объекта. Это соответствует понятию «функция» для абстрактного множества. Поэтому, если  $S$  является функцией

$$S : X \rightarrow Y, \quad (6)$$

то соответствующая система называется функциональной, а отношения между компонентами системы можно назвать функциональными отношениями ( $F$ )

$$F : A \rightarrow B \text{ или } F : (A) \rightarrow B, \quad (7)$$

если  $F$  определена не для всех элементов  $A$ .

Область определения функции  $F$  можно представить в виде  $D(F) \subseteq A$ , а область значений будет определяться как  $R(F) \subseteq B$ . Однако использование системного инжиниринга для анализа технологических систем предполагает также учет состояния системы в конкретный момент времени, поскольку каждый процесс преобразования исходного материала в конечное изделие или оказываемое воздействие можно представить в виде отдельных технологических актов, в ходе которых происходит получение и/или формирование функциональных свойств готового продукта. Совокупность таких состояний назовем множеством глобальных состояний системы  $S$ , а его элементы будут являться глобальными состояниями системы. При этом появляется еще функция  $R$ , которую назовем глобальной реакцией системы. Тогда если  $S$  – это некоторая технологическая система, а  $C$  – произвольное множество, тогда функцию  $R$  можно представить следующим образом

$$([x, y] \in S \Leftrightarrow (\exists c \in C)[R(c, x) = y]). \quad (8)$$

### Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим применение основных положений системного инжиниринга для процесса получения порошкового покрытия методом холодного газодинамического напыления (ХГДН). Покрытия, полученные этим методом, находят широкое применение для герметизации отверстий, щелей, микротрещин, восстановления формы изношенных деталей, антикоррозионной защиты локальных участков стальных деталей и элементов стальных конструкций, а также в качестве технологических покрытий на алюминиевых, стальных, чугунных, керамических и стеклянных деталях для пайки, обеспечения электропроводности на алюминии, стали, стекле, керамике, получении светоотражающих покрытий и др. [19–23].

Как известно, холодное газодинамическое напыление – это процесс формирования металлических покрытий в результате соударения холодных (с температурой, существенно меньшей температуры плавления) порошковых металлических частиц размером от 0,01 до 50 мкм, ускоренных сверхзвуковым газовым потоком до скорости несколько сот метров в секунду, с поверхностью обрабатываемой детали. В результате высокой скорости полета частиц при соударении с поверхностью детали происходит их пластическая деформация, которая трансформируется в тепловую, что, в свою очередь, обеспечивает высокую прочность сцепления получаемого покрытия с основой. На рис. 1 показан пример последовательности деформации медной частицы, напыленной со скоростью 650 м/с на алюминиевую подложку при ХГДН [24].

В процессе напыления происходит эрозионный износ подложки, внедрение и деформация частицы напыляемого материала и формирование адгезионного контакта на поверхности. Последующие частицы формируют покрытие в месте контакта с внедренной частицей. Этот

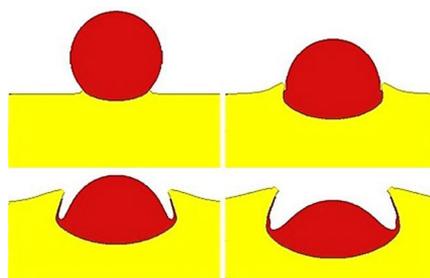


Рис. 1. Схема взаимодействия медной частицы с алюминиевой подложкой при напылении методом холодного газодинамического напыления [24]

Fig. 1. Scheme of interaction of copper particle with aluminum substrate in cold spray [24]

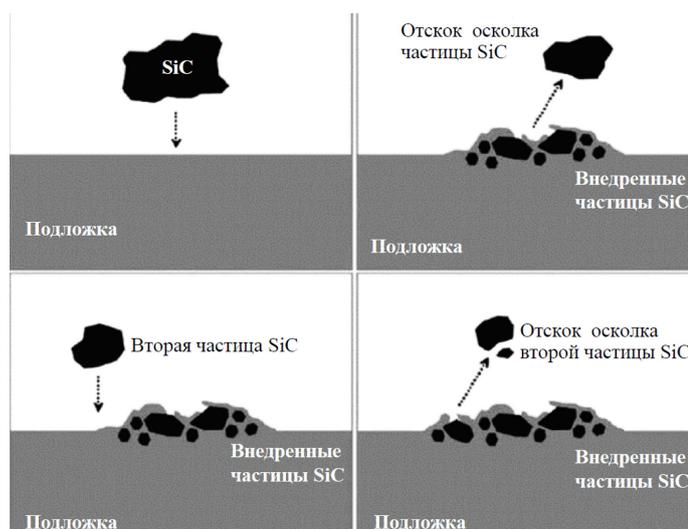


Рис. 2. Взаимодействие частиц карбида кремния SiC с подложкой из сплава Inconel 625 [25]

Fig. 2. Interaction of silicon carbide particles with Inconel 625 substrate [25]

процесс сопровождается локальным повышением температуры на границе раздела частиц без достижения температуры плавления напыляемого материала.

Вследствие высоких скоростей полета отдельных порошковых частиц при их взаимодействии с поверхностью в ходе формирования покрытия могут протекать различные процессы (рис. 2) [25].

Придание высоких скоростей и большой кинетической энергии частицам происходит за счет особенности конфигурации сопла Лавая, которое является основным конструктивным элементом оборудования для ХГДН, что дает возможность формировать металлические покрытия при температурах, существенно меньших температуры их плавления. Покрытия, полученные методом ХГДН, не только имеют повышенную адгезию к металлическим поверхностям, но и обеспечивают различным конструктивным материалам широкий набор функциональных свойств. Использование модели «черного ящика» позволяет установить взаимосвязь между входными и выходными параметрами процесса ХГДН (рис. 3).

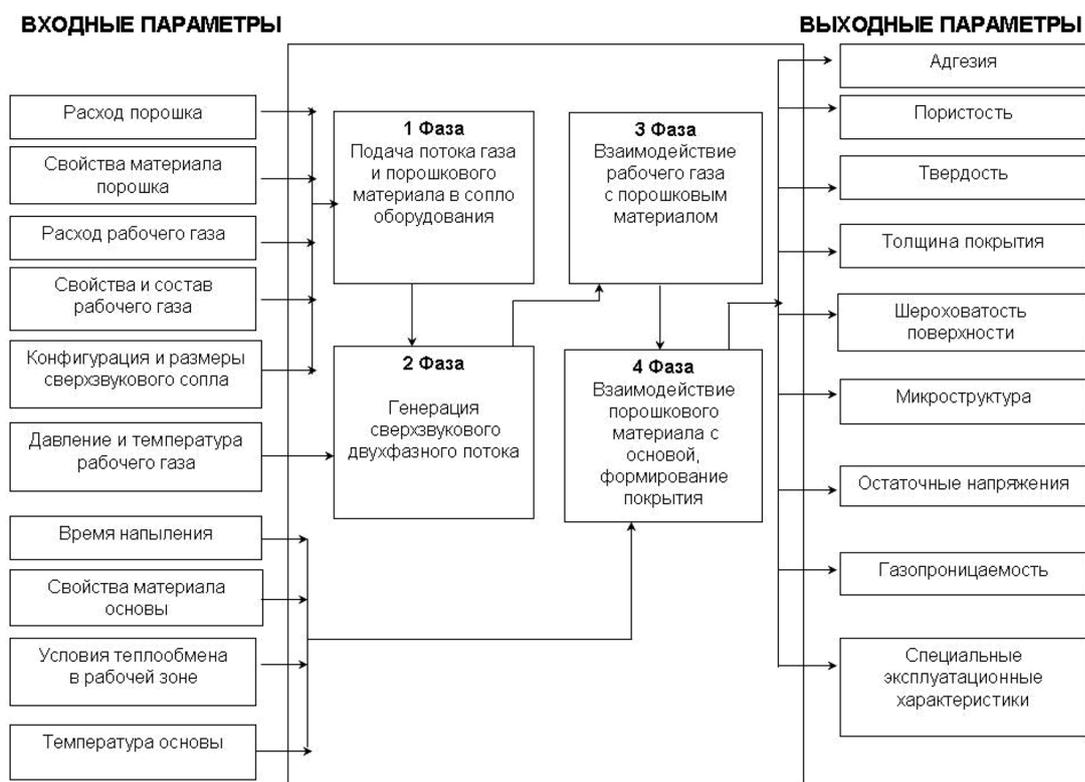


Рис. 3. Структурно-функциональная схема процесса холодного газодинамического напыления на основе системного инжиниринга

Fig. 3. Structural and functional scheme of cold spray based on system engineering

В процессе ХГДН при формировании свойств получаемого покрытия следует учитывать механизмы взаимодействия двухфазной струи с основой. При этом можно выделить характерные области протекания процесса в зависимости от скорости частиц порошкового материала [26]:

1 – скорость частиц меньше некоторого значения их критической скорости. В этом случае покрытие не образуется;

2 – скорость частиц больше их критической скорости, которой, однако, недостаточно для формирования покрытия. При этом основа испытывает определенное число ударов частиц порошкового материала, происходит ее очистка, некоторое количество частиц может закрепиться на основе;

3 – скорость частиц значительно выше их критической скорости. Частицы испытывают ударное воздействие при встрече с основой, в результате чего пластически деформируются, образуя покрытие.

Тогда свойства покрытия будут зависеть от вида и величины остаточных напряжений, а также от структуры и фазового состава наносимого материала (рис. 4).

Как известно, технологический процесс нанесения покрытий состоит из последовательно осуществляемых операций подготовки поверхности изделия, подготовки материала покрытия, непосредственно самого процесса формирования покрытия и при необходимости операции

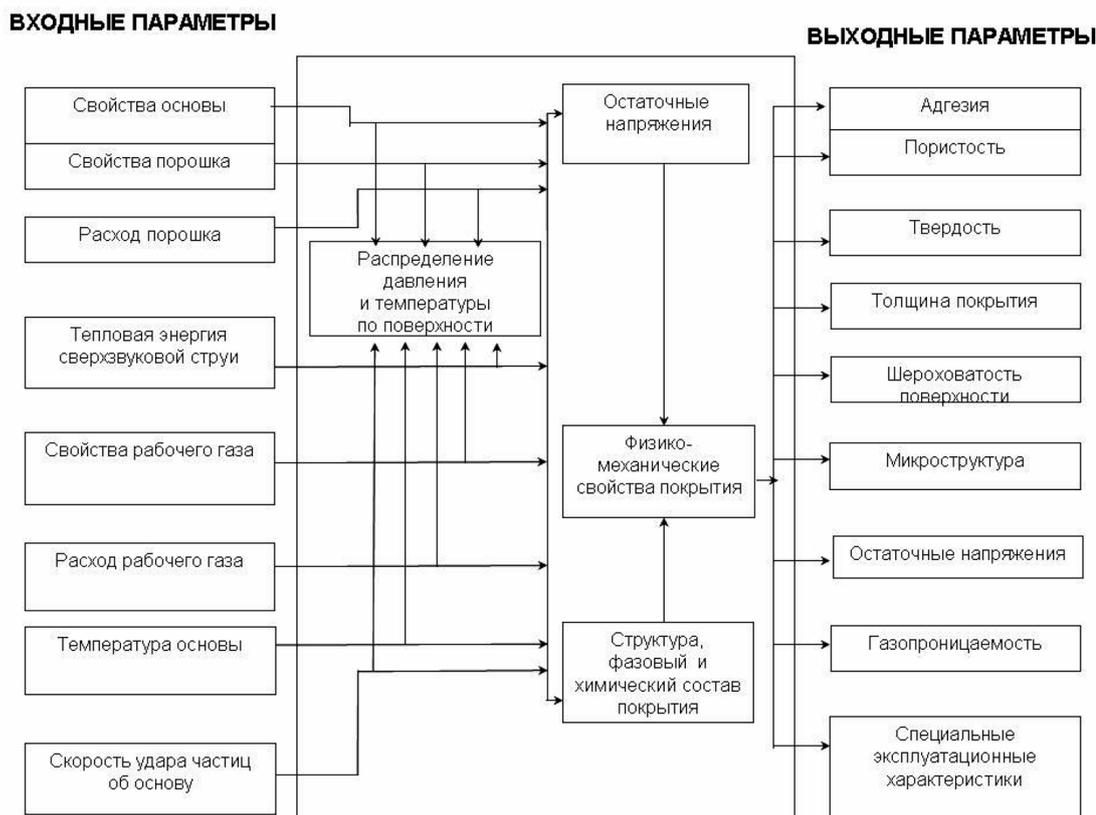


Рис. 4. Структурно-функциональная схема формирования функциональных свойств покрытия при холодном газодинамическом напылении

Fig. 4. Structural and functional scheme of coating functional properties formation in cold spray

окончательной обработки. Вполне очевидно, что каждая технологическая операция основана на протекании определенных физических или химических процессов, которые определяют ее технологические режимы. С другой стороны, для достижения необходимого результата, а именно получения покрытия с требуемыми функциональными свойствами, необходимо учитывать управляющие параметры, варьирование которых оказывает существенное влияние на уровень получаемых свойств (рис. 5).

Следует отметить, что при исследовании или проектировании реального технологического процесса необходимо учитывать, что, несмотря на непрерывность процесса обработки в масштабе общего времени процесса, реально контроль параметров производится в отдельные моменты времени. Такими моментами являются вход и выход в зону оперативной обработки, которыми являются технологическая стадия или операция, элемент оборудования или компонент технологической установки и т.д. Поэтому на практике следует рассматривать вход и выход технологической системы (функции  $x(t)$  и  $y(t)$ ) как дискретные функции времени. Обозначим количество операций через  $n$ , моменты начала и окончания  $k$ -й операции (моменты входа и выхода из  $k$ -й зоны обработки) через  $t_k$  и  $t_k^*$  соответственно. Тогда вход и выход системы можно представить как последовательности  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  и  $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$  соответственно. Между

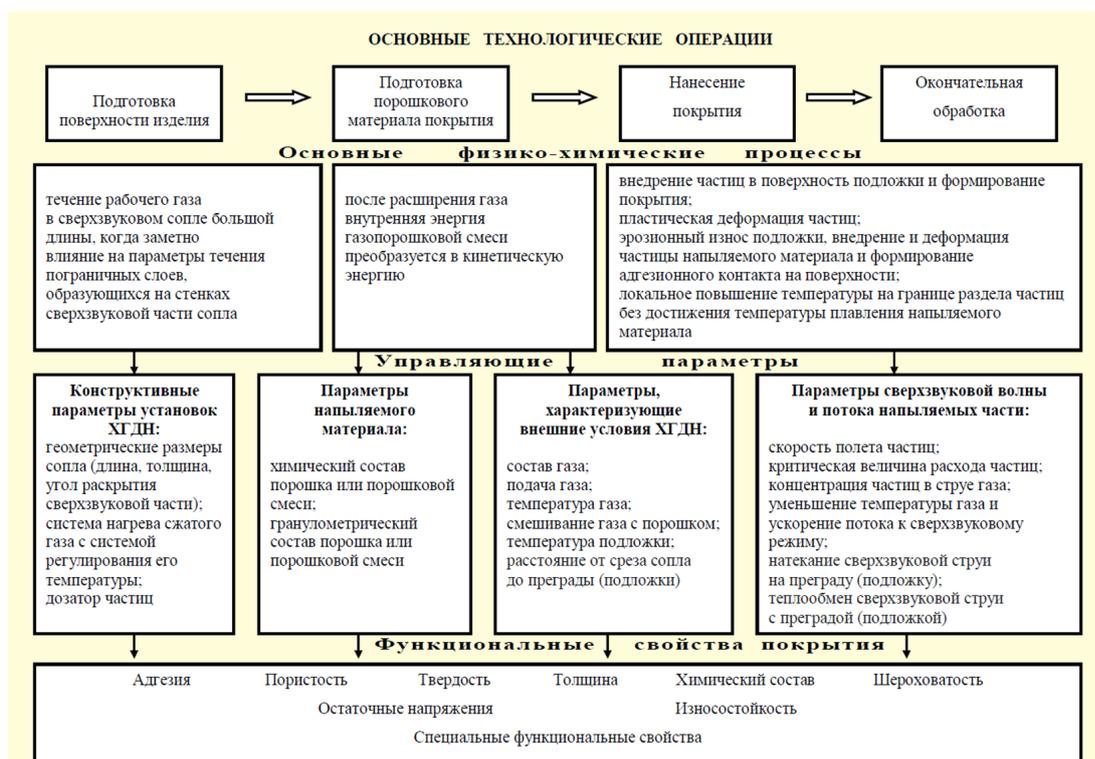


Рис. 5. Система взаимосвязей между управляющими (контролируемыми) параметрами холодного газодинамического напыления и функциональными свойствами получаемого покрытия

Fig. 5. System of connections between cold spray operational (controlled) parameters and obtained coating functional properties

функциями входа и выхода  $x(t)$ ,  $y(t)$  и последовательностями  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  можно установить следующее соотношение

$$x_i \approx \left\{ x(t) \middle| t \in T_i^* \right\}, y_i \approx \left\{ y(t) \middle| t \in T_i^* \right\} \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (9)$$

Тогда  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  интегрируют воздействие, характерное для каждой технологической операции, а также результат этого воздействия на материал и/или изделие на  $i$ -й операции, что позволяет прогнозировать формирование функциональных свойств рассматриваемого объекта с учетом особенностей внешнего воздействия и управляющих параметров процесса нанесения покрытия.

### Вывод

Таким образом, развитие понятия «общая система» требует рассмотрения её как процесса последовательных состояний, т.е. длящейся во времени. Следует отметить, что для исследования процесса важны состояния системы, привязанные не столько к физическому моменту времени, сколько к стадии функционирования системы. С этой точки зрения время следует рассматривать как абстрактную математическую структуру, наделённую определёнными свойствами.

Системный инжиниринг является эффективным инструментом представления технологической системы в виде взаимодействия входных и выходных параметров. Это обеспечивает

возможность описания технологических процессов как взаимосвязь воздействий различной физической природы и исследования результатов таких воздействий на формирование функциональных свойств материалов и изделий. При этом процедура выбора технологии сводится к конечному алгоритму принятия решения ее построения.

### Список литературы / References

[1] Рубин Г.Ш. *Квалиметрия метизного производства*. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 167 с. [Rubin G. Sh. *Qualimetry of metal ware manufacturing*, Magnitogorsk, Editing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, 167 p (in Russian)]

[2] Павлов Ю.А. Системный анализ и синтез технологий обработки материалов, *Горные науки и технологии*, 2014, 1, 67–77 [Pavlov Yu. A. System analysis and synthesis of material processing technologies, *Mininig sciences and technologies*, 2014, 1, 67–77 (in Russian)]

[3] Бондарева Г.И. Системный анализ объектов, функций и ресурсов в процессах восстановления деталей машин, *Агроинженерия*, 2010, 2(41), 119–124 [Bondareva G. I. System analysis of objects, functions, and resources in the processes of machine components renovation, *Agricultural Engineering*, 2010, 2(41), 119–124 (in Russian)]

[4] Полякова М.А., Янсаитова М.И. Методика определения свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий на основе установления системных связей, *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*, 2019, 17(4), 44–51 [Polyakova M. A., Yansaitova M. I. Method for determining the properties of vacuum ion-plasma coatings by establishing system relationships, *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2019, 17(4), 44–51 (in Russian)]

[5] Рубин Г.Ш., Данилова Ю.В., Полякова М.А. Системный анализ в стандартизации. Стандартизация как форма взаимодействия систем, *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*, 2016, 4(52), 100–105 [Rubin G. Sh., Danilova Yu.V., Polyakova M. A. System analysis in standardization. Standardization as the form of system cooperation, *Mordern technologies. System analysis. Simulation*, 2016, 4(52), 100–105 (in Russian)]

[6] Рубин Г.Ш., Данилова Ю.В., Полякова М.А. Системный анализ в стандартизации. Принцип системности в стандартизации, *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*, 2017, 1(53), 118–123 [Rubin G. Sh., Danilova Yu.V., Polyakova M. A. System analysis in standardization. Principle of consistency in standardization, *Mordern technologies. System analysis. Simulation*, 2017, 1(53), 118–123 (in Russian)]

[7] Шпотя Д.А. *Системный подход к разработке методического инструментария проектирования технических объектов с помощью модельно-ориентированного системного инжиниринга*, автореф. дис. ... канд. техн. наук. Долгопрудный, 2022, 24 с. [Shpotya D. A. Systems approach to the development of methodological tools to design technical objects using model-oriented systems engineering, *Thesis ... cand of tech. Sci.* Dolgoprudny, 2022, 24 p. (in Russian)]

[8] Haberfellner R., de Weck O., Fricke E., Vossner S. *System engineering. Fundamentals and Applications*, Birkhäuser Cham, 2019, 458 p.

[9] Hallqvist J., Larsson J. Introducing MBSE by using systems engineering principles, *INCOSE International Symposium*, 2016, 26(1), 512–525.

[10] Рубин Г.Ш., Чукин М.В., Гун Г.С., Полякова М.А. Функционально-целевой анализ как метод структурирования свойств и функций металлоизделий. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*, 2016, 59(10), 715–719 [Rubin G. Sh., Chukin M. V., Gun G. S., Polyakova M. A. Functional and oriented analysis as the method of metal items properties and functions structuring, “*Izvestiya. Ferrous Metallurgy*” (“*Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*”), 2016, 59(10), 715–719 (in Russian)]

[11] Аверьянов А.М. *Системное познание мира: методологические проблемы*. М.: Политиздат, 1985. 264 с. [Averyanov A.M. *System knowledge of the world: methodological problems*, Moscow, Politizdat, 1985, 264 p. (in Russian)]

[12] Берталанфи Л. Фон. Общая теория систем: критический обзор, *Исследования по общей теории систем: сборник переводов*. М.: Прогресс, 2009. 23–82 [Bertalanfi L. Fon. General system theory: critical review, *Investigations about general system theory: collection of translations*, Moscow, Progress, 2009, 23–82 (in Russian)]

[13] Садовский В.Н. *Основания общей теории систем: логико-методологический анализ*. М.: Наука, 1974. 279 с. [Sadovski V.N. *Basics of general system theory: logic and methodological analysis*, Moscow, Nauka, 1974, 279 p. (in Russian)]

[14] Иванов А.М., Петров В.П., Сидоров И.С., Козлов К.А. *Общая теория систем*. СПб.: Научная мысль, 2005. 480 с. [Ivanov A. M., Petrov V. P., Sidorov I. S., Kozlov K. A. *General system theory*, StPetersburg, Nauchnaya mysl, 2005, 480 p. (in Russian)]

[15] Коберн А. *Современные методы описания функциональных требований к системам*. М.: Издательство Лори, 2011. 288 с. [Kobern A. *Modern methods to describe the functional demands to systems*, Moscow, Editing house Lory, 2011, 288 p. (in Russian)]

[16] Ширяева Е.Н., Полякова М.А., Терентьев Д.В. Анализ взаимосвязей технических систем на иерархически связанных уровнях производства стального листа горячей прокаткой. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*, 2020, 76(8), 847–855 [Shiryayeva E.N., Polyakova M. A., Terentyev D. V. Analysis of steel sheet hot rolling process on hierarchical connected technological levels, *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2020, 76(8), 847–855 (in Russian)]

[17] Полякова М.А., Седлецкая О.В. Особенности вещественных, энергетических и информационных потоков в технологической системе «горячее цинкование стального проката». *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, 2023, 3, 539–547 [Polyakova M. A., Sedletskaya O. V. Peculiarities of material, energy, and information flows in the technological system “hot dip galvanizing of steel rolled sheet”, *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*, 2023, 3, 539–547 (in Russian)]

[18] Дж. ван Гиг. *Прикладная общая теория систем*. Т. 1. М. Мир, 1981 336 с. [J. van Gig. *Applied general system theory*, Moscow, Mir, 1981, 336 p. (in Russian)]

[19] Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. *Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика*. М.: Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2009. 537 с. [Alhimov A. P., Klinkov S. V., Kosarev V. F., Fomin V. M. *Cold spray. Theory and practice*. Moscow, Editing company “Physical and mathematical literature, 2009, 537 p. (in Russian)]

[20] Irissou E., Legoux J.-G., Ryabiniin A. N., Jodoin B., Moreau C. Review of cold spray process and technology: part I – intellectual property, *Journal of Thermal Spray Technology*, 2008, 17(4), 495–516.

[21] Moridi A., Hassani-Gangaraj S., Guagliano M., Dao M. Cold spray coating: review of material systems and future perspectives, *Surface Engineering*, 2014, 36(6), 369–395.

[22] Gärtner F., Stoltenhoff T., Schmidt T., Kreye H. The cold spray process and its potential for industrial applications, *Journal of Thermal Spray Technology*, 2006, 15(2), 223–232.

[23] Champagne V., Helfrich D. Mainstreaming cold spray – push for applications, *Surface Engineering*, 2014, 30(6), 396–403.

[24] Козлов И.А., Лещев К.А., Никифоров А.А., Демин С.А. Холодное газодинамическое напыление покрытий (обзор). *Труды ВИАМ*, 2020, 8(90), 77-93 [Kozlov I.A., Leshchev K.A., Nikiforov A.A., Demin S.A. Cold spray of coatings (review), *Trudy VIAM (Proceedings of VIAM)*, 2020, 8(90), 77-93 (in Russian)]

[25] Seo D., Sayar M., Ogawa K. SiO<sub>2</sub> and MoSi<sub>2</sub> formation on Inconel 625 surface via SiC coating deposited by cold spray, *Surface and Coatings Technology*, 2012, 206, 2851–2858.

[26] Косарев В.Ф. *Физические основы холодного газодинамического напыления*, автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2003, 32 с. [Kosarev V.F. *Physical basics of cold spray*, *Thesis ... doctor of tech. sci.* Novosibirsk, 2003, 32 p. (in Russian)]