

# ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова

2025. Т.23, №2

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. По результатам экспертной оценки ВАК журнал отнесен к категории К1. Журнал индексируется в международных и российских базах данных: Ulrich's Periodicals Directory, Crossref, Google Scholar, RSCI, ядро РИНЦ, ВИНТИ и др. Электронные версии журнала размещаются на сетевом ресурсе Научной Электронной Библиотеки в сети Интернет.

Издается с марта 2003 года

Председатель редакционной коллегии  
В.М. Колокольцев (Россия)

Т.Н. Александрова (Россия), Ж.-Б. Вогт (Франция),  
С.Е. Гавришев (Россия), О.Е. Горлова (Россия),  
В.Е. Громов (Россия), Я. Грум (Словения),  
И.Г. Гун (Россия), М. Дабала (Италия),  
Х. Дыя (Польша), Р.О. Дюссан (Индия),  
Р. Кавалла (Германия), В.Н. Калмыков (Россия),  
Д.Р. Каплунов (Россия), А.Г. Корчунов (Россия),  
О.С. Логунова (Россия), Д. Милованович (Сербия),  
К. Мори (Япония), И. Мусирин (Малайзия),  
А.Б. Найзабеков (Казахстан), Н.Н. Орехова (Россия),  
М. Пьетшик (Польша), В.Ф. Рашников (Россия),  
Г.А. Роджерсон (Великобритания), О.Н. Тулупов (Россия),  
Ю Фенг (Китай), В.Р. Храмшин (Россия), Р. Цин (Великобритания)

## РЕДАКЦИЯ

Главный редактор О.Н. Тулупов  
Первый заместитель главного редактора  
М.А. Полякова  
Заместители главного редактора:  
А.Г. Корчунов, О.С. Логунова,  
Н.Н. Орехова, В.Р. Храмшин  
Редактор Н.П. Боярова  
Технический редактор Т.В. Леонтьева  
Перевод на английский А.Р. Карагузина  
Дизайн обложки: А.Д. Григорьев

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2025

Свидетельство о регистрации ПИ №ФС 77-59632 от 10.10.2014 г.

Выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Учредитель – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова.  
(455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38).

16+, в соответствии с Федеральным законом №436-ФЗ от 29.12.2010.

## Адрес редакции:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск,  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»  
пр. К. Маркса, 45/2, оф. 402  
Тел.: (3519) 22-14-93.  
URL: <http://www.vestnik.mgtu.ru>  
Email: [vestnik@mgtu.ru](mailto:vestnik@mgtu.ru); [rio\\_mgtu@mail.ru](mailto:rio_mgtu@mail.ru)

## Адрес издателя:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. К. Маркса, 45/2,  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», издательский центр

## Адрес типографии:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38,  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», участок оперативной полиграфии  
Выход в свет 30.06.2025. Заказ 188. Тираж 500 экз. Цена свободная.

# VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

---

2025. Vol.23, no.2

---

The journal is included in the List of Russian Peer-Reviewed Scientific Journals, which are supposed to publish the major results of doctoral and PhD theses. Following an expert assessment of the Higher Attestation Commission, the journal is classified as category K1. The journal is indexed in international and Russian databases: Ulrich's Periodicals Directory, Crossref, Google Scholar, RSCI, the core of RSCI, VINITI (the All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences), and others. Digital versions of the journal are available at the network resource of the Scientific Electronic Library on the Internet.

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

## EDITORIAL BOARD MEMBERS

Head of the Editorial Board V.M. Kolokoltsev (Russia)

T.N. Aleksandrova (Russia), M. Dabala' (Italy),  
R.O. Dusane (India), H. Dyja (Poland), Ye Feng (China),  
S.E. Gavrishev (Russia), O.E. Gorlova (Russia),  
V.E. Gromov (Russia), J. Grum (Slovenia), I.G. Gun (Russia),  
V.N. Kalmykov (Russia), D.R. Kaplunov (Russia),  
R. Kawalla (Germany), V.R. Khamshin (Russia),  
A.G. Korchunov (Russia), O.S. Logunova (Russia),  
D. Milovanovic (Serbia), K. Mori (Japan),  
I. Musirin (Malaysia), A.B. Naizabekov (Kazakhstan),  
N.N. Orekhova, M. Pietrzyk (Poland), R. Qin (UK),  
V.F. Rashnikov (Russia), G.A. Rogerson (UK),  
O.N. Tulupov (Russia), J.-B. Vogt (France)

## EDITORIAL STAFF

Editor-in-Chief O.N. Tulupov

First Deputy Chief Editor M.A. Polyakova

Deputy Chief Editors:  
A.G. Korchunov, O.S. Logunova,  
V.R. Khamshin, N.N. Orekhova

Editor N.P. Boyarova

Technical Editor T.V. Leontyeva

Translated into English A.R. Karaguzhina

The cover is designed by A.D. Grigorev

© Federal State Budgetary Institution of Higher Education  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2025

Registration certificate PI # FS 77-59632 dated October 10, 2014 is issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media.

Founder – Nosov Magnitogorsk State Technical University  
(38, pr. Lenina, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, 455000)

16+ in accordance with Federal Law №436-FZ dated 29.12.2010

## Editorial office:

402, 45/2 Karl Marks prospekt,  
Magnitogorsk, Chelyabinsk region, 455000, Russia  
Nosov Magnitogorsk State Technical University  
Phone: +7 (3519) 221 493.  
URL: <http://www.vestnik.mgtu.ru>  
Email: [vestnik@mgtu.ru](mailto:vestnik@mgtu.ru); [rio\\_mgtu@mail.ru](mailto:rio_mgtu@mail.ru)

## Publisher office:

45/2 Karl Marks prospekt, Magnitogorsk, Chelyabinsk region, 455000, Russia  
Nosov Magnitogorsk State Technical University

## Printing office:

38 Lenin prospekt, Magnitogorsk, Chelyabinsk region, 455000, Russia  
Nosov Magnitogorsk State Technical University

Publication date: 30.06.2025. Order 188. Circulation: 500. Open price.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ .....</b>	<b>5</b>
<i>Мишкuroв П.Н., Рахмангулов А.Н.</i>	
Способ цифровизации железнодорожных перевозок на путях необщего пользования горнодобывающих предприятий.....	5
<i>Арабаджи Я.Н., Орехова Н.Н., Тюленев А.Ю., Баранова Л.П.</i>	
Снижение механического выноса кремнийсодержащих минералов вмещающих пород в концентрат путем оптимизации режимных параметров технологического процесса.....	18
<i>Чебан А.Ю.</i>	
Повышение эффективности открытых горных работ за счет совершенствования грохотильно-дробильных перегрузочных пунктов .....	28
<i>Кисляков В.Е., Федотов А.С., Снетков Д.С., Шварцкопф А.В.</i>	
Исследование взаимосвязи различных показателей качества для угольных месторождений.....	35
<b>МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ .....</b>	<b>41</b>
<i>Харченко А.С., Павлов А.В., Юдина С.В., Сибгатуллин С.К., Свечникова Н.Ю., Юдин Д.В.</i>	
Математическое моделирование влияния эквивалентной крупности кокса на изменение температурного режима по радиальным зонам доменной печи для различных параметров загрузки и дутья .....	41
<i>Кирич Ю.П.</i>	
Тенденции развития магнитоермических технологий получения губчатых титана и циркония .....	50
<i>Герасев С.А., Глазова К.Д., Курочкин И.О., Кузнецов В.В., Литвинова Т.Е.</i>	
Попутное извлечение редкоземельных элементов из фосфогипса карбонатно-щелочным методом.....	61
<i>Шарипзянова Г.Х.</i>	
Сложнооксидная керамика редкоземельных элементов для ядерных реакторов .....	71
<b>ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО .....</b>	<b>78</b>
<i>Ерохин Ю.В., Козлов П.С., Захаров А.В., Ширяев П.Б., Леонова Л.В.</i>	
Вещественный состав шлаков Среднеуральского медеплавильного завода .....	78
<b>ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ..</b>	<b>88</b>
<i>Мальков О.В., Карельский А.С.</i>	
Обеспечение точности резьбы при фрезеровании на основе расчета перемещения инструментальной наладки .....	88
<b>МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ .....</b>	<b>97</b>
<i>Сычков А.Б., Завалишин А.Н., Атангулова Г.Я., Малашкин С.О., Шекшеев М.А., Касимов Д.Т.</i>	
Особенности структурообразования и временные изменения механических свойств горячекатаного арматурного проката из стали 25Г2С .....	97

## CONTENTS

<b>SUBSOIL USE .....</b>	<b>5</b>
<i>Mishkurov P.N., Rakhmangulov A.N.</i>	
Digitization Method of Railway Transportation for Mining Enterprises .....	5
<i>Arabadzhi Ya.N., Orekhova N.N., Tyulenev A.Yu., Baranova L.P.</i>	
Reduction of Mechanical Entrainment of Silica-Bearing Gangue Minerals to Concentrate by Optimizing the Operating Parameters of the Technological Process .....	18
<i>Cheban A.Yu.</i>	
Increasing the Efficiency of Open Mining Through Improving Screening and Crushing Transfer Points.....	28
<i>Kislyakov V.E., Fedotov A.S., Snetkov D.S., Shvartskopf A.V.</i>	
Investigation of the Interconnection Between Various Quality Indicators for Coal Deposits .....	35
<b>METALLURGY OF FERROUS, NON-FERROUS AND RARE METALS.....</b>	<b>41</b>
<i>Kharchenko A.S., Pavlov A.V., Yudina S.V., Sibagatullin S.K., Svechnikova N.Yu., Yudin D.V.</i>	
Mathematical Modeling of the Influence of Equivalent Coke Size on the Change in Temperature Conditions in Radial Zones of a Blast Furnace for Various Loading and Blasting Parameters.....	41
<i>Kirin Yu.P.</i>	
Trends in the Development of Magnesiothermal Technologies for Producing Titanium and Zirconium Sponge .....	50
<i>Gerasev S.A., Glazova K.D., Kurochkin I.O., Kuznetsov V.V., Litvinova T.E.</i>	
Associated Rare Earth Elements Extraction from Phosphogypsum by Carbonate-Alkaline Method.....	62
<i>Sharipzyanova G.Kh.</i>	
Complex Oxide Ceramics of Rare Earth Elements for Nuclear Reactors .....	71
<b>FOUNDRY ENGINEERING.....</b>	<b>78</b>
<i>Erokhin Yu.V., Kozlov P.S., Zakharov A.V., Shiryayev P.B., Leonova L.V.</i>	
Material Composition of Slag from the Sredneuralsk Copper Smelter .....	78
<b>MATERIAL PROCESS ENGINEERING.....</b>	<b>88</b>
<i>Malkov O.V., Karelskiy A.S.</i>	
Providing the Accuracy of the Thread During Milling Based on the Calculation of the Movement of the Tool Setup.....	88
<b>MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS.....</b>	<b>97</b>
<i>Sychkov A.B., Zavalitshin A.N., Atangulova G.Ya., Malashkin S.O., Shecsheev M.A., Kasimov D.T.</i>	
Features of Structure Formation and Temporary Changes of Mechanical Properties of Hot-Rolled Reinforcing Bars Made of Steel 25G2S .....	97

<b>Бодров Е.Г., Шабалина Д.А., Самодурова М.Н., Киселев М.В., Зайцева О.В., Трофимов Е.А.</b> Моделирование фазового состава и кристаллизации сплавов М(Сr30W5С1.5).....	111
<b>Арышенский Е.В., Рагазин А.А., Распоиенко Д.Ю., Коновалов С.В., Арышенский В.Ю., Лапишов М.А.</b> Исследование влияния режима гомогенизации на механические свойства и микроструктуру листа из алюминиевого высокомагниевого сплава с добавками скандия, циркония, гафния и эрбия.....	119
<b>Некрасов Р.Ю., Овсянников В.Е., Губенко А.С.</b> Повышение качества втулок цилиндров буровых насосов на основе использования серого чугуна с упрочненным слоем .....	128
<b>Чаугарова Л.З., Неупокоева А.А., Ковенский И.М.</b> Влияние внутренних напряжений, возникающих при воздействии химико-термической обработки, на свойства электроосажденных хромовых покрытий.....	134
<b>УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА .....</b>	<b>140</b>
<b>Антипов Д.В., Губанова О.Г.</b> Оценка устойчивости и адаптивности системы менеджмента качества с позиции закономерности целостности (эмерджентности).....	140
<b>Дыбулина Н.С., Царева С.А.</b> Модель оценки результативности процессов системы менеджмента качества на основе применения алгоритма Мамдани в среде MATLAB.....	148
<b>Запорожцев А.В., Хазова Вер.И., Хазова Вик.И.</b> Улучшение производственных процессов системы менеджмента качества на основе моделирования ...	158
<b>Мазунова Л.Н., Беляков В.В., Ерофеева Л.Н., Бушуева М.Е., Лазаревич С.В., Шетулова Т.Г.</b> Применение методики вычисления интегрального показателя подвижности с целью повышения качества наземных транспортно-технологических средств на этапе проектирования .....	166
<b>НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ .....</b>	<b>176</b>
<b>Кузьменко В.П.</b> Разработка модели управления подогревом батарей малого беспилотного летательного аппарата с применением светодиодных систем для обеспечения заданного качества полета.....	176
<b>ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ .....</b>	<b>188</b>
<b>Щеглов Д.К., Щеглов К.Н.</b> Экспресс-методика оценки сложности новых разработок на основе проектов-аналогов.....	188

<b>Bodrov E.G., Shabalina D.A., Samodurova M.N., Kiselev M.V., Zaitseva O.V., Trofimov E.A.</b> Modeling of Phase Composition and Crystallization of M(Cr30W5C1.5) Alloys.....	111
<b>Aryshenskiy E.V., Ragazin A.A., Rasposienko D.Yu., Konovalov S.V., Aryshenskiy V.Yu., Lapshov M.A.</b> Study of the Influence of the Homogenization Treatment on the Mechanical Properties and Microstructure of a Sheet of High-Magnesium Aluminum Alloy Doped with Scandium, Zirconium, Hafnium and Erbium .....	119
<b>Nekrasov R.Yu., Ovsyannikov V.Ye., Gubenko A.S.</b> Improving the Quality of Drilling Pump Cylinder Liners Based on the Use Of Gray Iron With a Hardened Layer.....	128
<b>Chaugarova L.Z., Neupokoeva A.A., Kovenskiy I.M.</b> The Influence of Internal Stresses Arising when Exposed to Chemical and Thermal Treatment, on the Properties of Electrodeposited Chromium Coatings.....	134
<b>PRODUCT QUALITY MANAGEMENT. STANDARDIZATION. INDUSTRIAL MANAGEMENT .....</b>	<b>140</b>
<b>Antipov D.V., Gubanov O.G.</b> Evaluation of the Sustainability and Adaptability of the Quality Management System from the Perspective of Integrity (Emergency) .....	140
<b>Dybulina N.S., Tsareva S.A.</b> Model for Assessing of the Quality Management System Processes Performance Based on the Application of the Mamdani Algorithm in Matlab Environment.....	148
<b>Zaporozhtsev A.V., Khazova Ver.I., Khazova Vik.I.</b> Modelling Based Improvement of QMS Manufacturing Processes.....	158
<b>Mazunova L.N., Belyakov V.V., Erofeeva L.N., Bushueva M. E., Lazarevich S.V., Shetulova T.G.</b> Application of the Methodology for Calculating the Integral Mobility Index in Order to Improve the Quality of Ground Transportation and Technological Facilities and Complexes at the Development Stage ....	166
<b>NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT .....</b>	<b>176</b>
<b>Kuzmenko V.P.</b> Development of a Battery Heating Control Model for a Small Unmanned Aerial Vehicle Using Led Systems to Ensure the Specified Flight Quality.....	176
<b>ECONOMICS, MANAGEMENT AND PRODUCT MARKET .....</b>	<b>188</b>
<b>Shcheglov D.K., Shcheglov K.N.</b> Express Method for Assessing the Complexity of New Developments Based on Analog Projects .....	188





## СПОСОБ ЦИФРОВИЗАЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗОК НА ПУТЯХ НЕОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Мишкuroв П.Н., Рахмангулов А.Н.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Аннотация.** Тенденция цифровизации управленческой деятельности для повышения её качества и оперативности создаёт предпосылки для решения проблемы управления железнодорожными перевозками в режиме реального времени. Повышение требований структурных подразделений горнодобывающих предприятий к своевременности перевозок и стремление к сокращению транспортно-складских затрат в результате уменьшения размера транспортной партии приводят к усложнению как состава поездов, так и технологии их переработки на промышленных железнодорожных станциях. Становится критически актуальной задача оптимизации переработки поездов и перемещения отцепов вагонов на путях необщего пользования крупных горнодобывающих предприятий со сложной схемой путевого развития. В статье предлагается способ цифровизации железнодорожных перевозок, основанный на автоматизации формирования и выбора оптимальной последовательности маневровых операций как на отдельной промышленной железнодорожной станции, так и на путях необщего пользования в целом. Показано, что реализация разработанного способа возможна путём описания схемы путевого развития железнодорожной станции двухвершинным графом. Приводится краткий анализ применения известных видов графов для описания схем путевого развития железнодорожной станции. Разработан новый вид графа – двухвершинный граф с отдельными биективными вершинами и рёбрами. Показаны достоинства и недостатки применения простых, двухвершинных и ресурсных графов для оптимизации маневровых маршрутов, состоящих из нескольких маневровых полурейсов. Предлагается способ оптимизации маневровых передвижений на основе описания схемы путевого развития в виде двухвершинного графа, часть рёбер которого соединена под острым углом. Доказана возможность и эффективность цифровизации железнодорожных перевозок в результате автоматизированного построения оптимальных маневровых маршрутов с использованием алгоритма оптимизации двухвершинного графа. Разработанный способ позволяет вырабатывать оптимальные решения по управлению маневровой работой на железнодорожных станциях и предлагается к реализации в составе имитационных моделей и интеллектуальных транспортных систем.

**Ключевые слова:** цифровизация железнодорожных перевозок, пути необщего пользования, горнодобывающее предприятие, железнодорожная станция, транспортная сеть, технологическая операция, маневровый маршрут, маневровый полурейс, поезд, двухвершинный граф, биективная вершина графа, имитационная модель

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-11-00164, <https://rscf.ru/project/23-11-00164/>.*

© Мишкuroв П.Н., Рахмангулов А.Н., 2025

### Для цитирования

Мишкuroв П.Н., Рахмангулов А.Н. Способ цифровизации железнодорожных перевозок на путях необщего пользования горнодобывающих предприятий // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 5-17. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-5-17>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# DIGITIZATION METHOD OF RAILWAY TRANSPORTATION FOR MINING ENTERPRISES

Mishkurov P.N., Rakhmangulov A.N.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** The trend towards digitalization of management activities to improve their quality and efficiency creates prerequisites for solving the problem of real-time management of railway transportation. Increasing requirements of structural subdivisions of mining enterprises to the timeliness of transportation and the desire to reduce transportation and storage costs as a result of reducing the size of the transportation lot lead to the complication of both the composition of trains and the technology of their processing at industrial railway stations. The task of optimizing the processing of trains and the movement of car uncouples on the public tracks of large mining enterprises with a complex scheme of track development becomes critically important. **Objectives.** The design of the method of digitalization of railway transportation is based on the automation of formation and selection of the optimal sequence of shunting operations both at a separate industrial railway station and on the railroad transportation of industrial enterprises. **Methods Applied.** It is shown that the realization of the developed method is possible by describing the scheme of track development of a railway station by a two-vertex graph. **Originality** is a new mathematical object - a two-vertex graph with separate bijective vertices and edges, which provides a correct representation of the railway station track scheme in the simulation model as a result of additional consideration of the angle between the graph edges. **Result.** The possibility and efficiency of digitalization of railway transportation as a result of automated construction of optimal shunting routes using the algorithm of two-vertex graph optimization is proved. This feature of the proposed graph allows to correctly describe railroad switches in the simulation model. In addition, using the proposed graph to provide an effective search for optimal (shortest) paths using known methods without the need to perform additional calculations for the correct modeling of train routes along the tracks of the railway station. **Practical Relevance.** The developed method allows working out optimal decisions on management of shunting work at railway stations and is offered for implementation as a part of simulation models and intelligent transportation systems.

**Keywords:** digitalization of railway transportation, non-public tracks, mining enterprise, railway station, transport network, technological operation, shunting route, shunting half-way, train, two-vertex graph, bijective vertex graph, simulation model

*The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 23-11-00164, <https://rscf.ru/project/23-11-00164/>.*

## For citation

Mishkurov P.N., Rakhmangulov A.N. Digitization Method of Railway Transportation for Mining Enterprises. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 5-17. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-5-17>

## Введение

Железнодорожный транспорт необщего пользования является важнейшим элементом промышленных производств. В частности, на крупных горнодобывающих предприятиях основные объёмы рудной массы, отходов производства, материалов, сырья, полуфабрикатов и готовой продукции перевозятся железнодорожным транспортом [1]. В настоящее время одним из основных факторов, ограничивающих повышение качества транспортного обслуживания структурных подразделений горнодобывающих предприятий, является расширение сортамента готовой продукции и, как следствие, усложнение структуры перевозок [2, 3]. Это связано с формированием поездов с большим числом групп вагонов разного назначения из-за принадлежности вагонов операторским компаниям и стремления грузовладельцев к уменьшению размера транспортно-грузовых партий, со снижением ритмичности отгрузки из-за ча-

стных изменений производственных программ [4, 5], а также с недостатками пропускной и перерабатывающей способностей железнодорожной инфраструктуры. Например, практика обработки вагонопотоков на промышленных железнодорожных станциях показывает значительное уменьшение коэффициента двоярных операций (выгрузка – погрузка) с вагонами из-за ограничений на погрузку порожних вагонов, принадлежащих разным собственникам.

Наблюдается увеличение дополнительных операций с вагонами в результате активного использования усреднительных складов и складов различных фракций готовой продукции или полуфабрикатов [6]. Кроме того, имеет место несвоевременная подготовка перевозочных документов, ошибки при размещении грузов в вагонах, рассогласованность решений по очередности подачи вагонов на грузовые фронты и т.д. Повышение требований структурных подразделений горнодобыва-

ющих предприятий к своевременности перевозок для сокращения транспортно-складских затрат усложняют принятие оперативных решений по управлению маневровой работой на промышленных железнодорожных станциях в условиях необходимости переработки поездов, состоящих из вагонов разных назначений [7].

Одним из основных структурных подразделений горнодобывающих предприятий являются обогатительные фабрики, поскольку затраты на их эксплуатацию и потери от простоя составляют, как правило, большую часть себестоимости продукции предприятия. Принятие неоптимальных управленческих решений в сложных условиях неравномерности и сложной структуры вагоно- и грузопотоков на железнодорожном транспорте приводит к возникновению простоев обогатительных фабрик и потерям у горнодобывающих предприятий в целом. Значимость принятия в оперативном режиме оптимальных решений по управлению железнодорожными перевозками горнодобывающих предприятий усиливается по мере усложнения условий их работы [8].

Одним из эффективных направлений решения перечисленных проблем является интеллектуализация и цифровизация управления внутризаводскими железнодорожными перевозками. Автоматизация процесса выработки решений по согласованной работе транспорта с остальными подразделениями горнодобывающего предприятия в режиме реального времени составляет основу цифровизации железнодорожных путей необщего пользования. В качестве инструмента реализации предлагаемого способа цифровизации в настоящем исследовании использована система имитационного моделирования. Предполагается, что модель будет выполнять имитацию железнодорожных перевозок, включая сложные маневровые операции на железнодорожных станциях. Имитационные прогоны в ускоренном режиме позволяют производить оценку принимаемых решений и выбирать наилучшую последовательность управленческих действий [9].

Исследования в области использования имитационных моделей в оперативном управлении железнодорожными перевозками на путях горнодобывающих предприятий [10] показали необходимость предварительного решения задачи низкоуровневой оптимизации и планирования маршрутов движения поездов и маневровых подач. С одной стороны, это позволяет снизить информационную нагрузку на диспетчеров, поскольку исключает необходимость принятия рутинных решений, поддающихся автоматизации. С другой стороны, модели оптимизации маршрутов позволяют реализовать с их использованием более сложные методы и алгоритмы прогнозирования оперативной ситуации и оптимизации технологии работы железнодорожного транспорта.

Проблема управления железнодорожными перевозками в режиме реального времени в настоящее время решается различными способами: корректировкой скорости движения поездов [11], приоритетности их движения [12] или времени выполнения маневровых операций [13]. Основным ограничением выполнения таких

корректировок является пропускная способность железнодорожной инфраструктуры, главным образом путей и стрелочных переводов. Поддержка оперативных управленческих решений с использованием информационных систем и имитационных моделей основана на описании схем путевого развития железнодорожных станций в форме графа. Вершинами графа описываются отдельные стрелочные переводы, группы стрелок или целые станции, рёбрами графа – железнодорожные пути, межстанционные перегоны.

Использование традиционных методик маршрутизации перевозок железнодорожной станции на основе графов ограничено рядом условий, которые определяют маршрут движения поезда. Например, если маршрут состоит из нескольких маневровых полурейсов, то необходимо менять направление движения поезда. На порядок выполнения маневровых полурейсов также оказывает влияние их вид – осаживанием, толчками, групповыми толчками [14]. Перечисленные факторы определяют способ формирования графа железнодорожной станции. Исследование существующих способов описания схем путевого развития железнодорожных станций и узлов в составе как имитационных, так и математических моделей позволило выявить три способа представления на графе железнодорожных стрелочных переводов: одной вершиной, двумя вершинами или рёбрами графа.

Первый, наиболее распространённый способ предполагает описание железнодорожной инфраструктуры простым неориентированным графом [15]. Недостатком способа является невозможность его использования для программного расчёта маршрута, состоящего из нескольких полурейсов с угловыми заездами для смены направления движения поезда. Другими словами, такой граф не учитывает невозможность поворота поезда на стрелке из-за того, что происходит формирование маршрута по соседним рёбрам графа, образующим острый угол друг с другом [16].

Второй способ основан на описании стрелочного перевода двумя соединёнными между собой вершинами графа. Рёбрами графа являются железнодорожные пути, которые соединяют одну пару вершин с другой парой и образуют двухвершинный граф [17, 18]. В этих работах двухвершинный граф впервые предложено использовать при решении относительно простой задачи пропуска транзитных поездов по станции без выполнения сложных маневровых операций. Достоинством данного способа является исключение (блокирование) угловых заездов поезда [19–21], недостатком – формирование маршрута движения поезда в одном направлении.

Третий способ основан на использовании так называемого «рёберного графа» [22], идея которого заключается в описании рёбер исходного графа вершинами рёберного графа. Тогда рёбра рёберного графа отображают связи между рёбрами исходного графа. Рёберный граф потенциально может использоваться при формировании маневрового маршрута, состоящего из нескольких полурейсов [23]. Однако использование

рёберного графа для описания схемы путевого развития требует сложных вычислений по переносу оценок рёбер исходного графа на рёберный граф.

Эксперименты по использованию рассмотренных известных способов для описания схем путевого развития железнодорожных станций в составе имитационных моделей показали их неэффективность. Это связано с тем, что способы не являются универсальными и, как следствие, их использование требует выполнения дополнительных вычислений и преобразований графа для учёта различных вариантов схем путевого развития станций. Выполнение таких вычислений приводит как к усложнению состава самой модели, так и к снижению её вычислительной эффективности, что не позволяет использовать имитационные модели в режиме реального времени для решения сложных управленческих задач.

Для устранения данных ограничений авторами предложен новый математический объект для описания путевого развития железнодорожных станций – двухвершинный граф с отдельными биективными вершинами и рёбрами. Особенностью предложенного двухвершинного графа является его совместимость со всеми известными методами поиска кратчайших путей на графе, использование которых позволяет автоматизировать работу по планированию сложных маршрутов движения поездов в имитационной модели. В состав таких сложных маршрутов может входить неограниченное число маневровых полурейсов. Предлагаемый двухвершинный граф обеспечивает «бесшовное» соединение полурейсов в составе маршрута при помощи двойной вершины графа, связывающей два ребра, расположенные под острым углом друг относительно друга.

### Цель исследований

Целью исследования является разработка способа цифровизации работы промышленных железнодорожных станций со сложной схемой путевого развития и маневровой работой на основе использования

имитационных моделей и нового алгоритма маршрутизации на двухвершинном графе с отдельными биективными вершинами и рёбрами, описывающего схему путевого развития станции.

Особенностью нового предлагаемого математического объекта – двухвершинного графа с отдельными биективными вершинами и рёбрами – является учёт дополнительного ограничения на величину угла между соседними рёбрами. Расположение подмножества рёбер графа под острым углом друг относительно друга соответствует конструкции стрелочного перевода. Эти ограничения не позволяют эффективно использовать известные виды графов в составе имитационных моделей для оптимизации железнодорожных перевозок на путях необщего пользования промышленных и горнодобывающих предприятий.

### Материалы и методы

Исследование существующих и предлагаемого способов описания схем путевого развития железнодорожных станций в имитационных моделях проводилось на примере промышленной железнодорожной станции крупного горнодобывающего предприятия (рис. 1). Основные параметры схемы путевого развития моделируемой станции представлены в табл. 1.

В качестве программного инструмента для построения имитационной модели использовалась программная среда AnyLogic [24–26]. Исходная схема путевого развития импортирована в имитационную модель с использованием открытых данных геоинформационной системы в формате Shape-файла. Такой способ обеспечивает поддержку реального масштаба и использование в модели фактических длин железнодорожных путей для принятого в AnyLogic способа автоматического расчёта времени движения поездов с заданной скоростью.

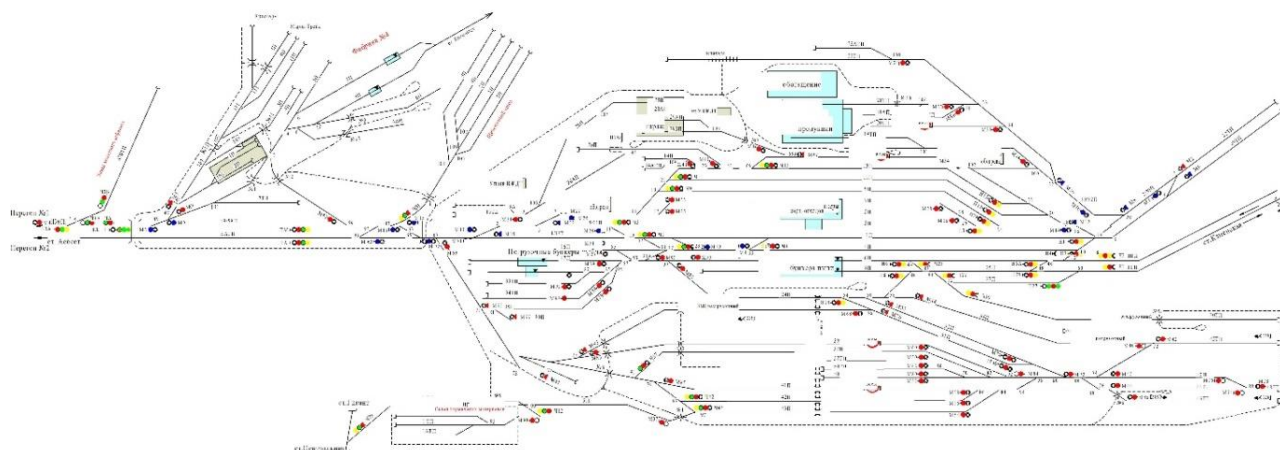


Рис. 1. Схема путевого развития моделируемой промышленной железнодорожной станции горнодобывающего предприятия

Fig. 1. Track plan of the modeled industrial railway station in the mining enterprise



Таблица 1. Основные параметры схемы путевого развития моделируемой промышленной железнодорожной станции

Table 1. Track plan main parameters for simulated industrial railway station

Элемент путевого развития	Количество
Приемо-отправочные пути	7
Вытяжные пути	8
Погрузо-выгрузочные пути	44
Соединительные пути	19
Примыкающие перегоны	4
Стрелочные переводы	115
Глухое пересечение	1

Для решения задач низкоуровневой оптимизации маневровых передвижений используется быстрый эвристический «sweep algorithm» [19], который позволяет находить множество всех оптимальных путей на графе от начальной заданной вершины до остальных вершин графа или возможные маршруты движения поезда по железнодорожной станции или в транспортном узле. Идея алгоритма основана на последовательной проверке для всех рёбер, исходящих из всех  $i$ -х вершин графа следующего условия:

$$L_{i=0,i} < L_{i=0,\lambda_i}, \quad (1)$$

где  $L_{i=0,i}$ ,  $L_{i=0,\lambda_i}$  – длины рёбер графа соответственно от начальной вершины ребра  $i=0$  до последующей  $i$ -й и предшествующей  $\lambda_i$ .

Вершина  $i$  включается в состав оптимального пути при выполнении условия (1).

Имитационная модель построена с использованием дискретно-событийного и агентного подходов в рамках одной модели [26]. Такое решение позволило реализовать в составе имитационной модели алгоритм оптимизации графа, а также алгоритмы управления движением поездов и маневровых составов без усложнения процессных диаграмм, составляющих основу дискретно-событийных имитационных моделей.

### Результаты исследования

Результаты проведённых экспериментов на построенной имитационной модели показали принципиальные особенности поиска оптимального манев-

рового маршрута в зависимости от вида графа, используемого для описания схемы путевого развития в составе имитационных моделей.

**Простой направленный граф.** Пусть  $G(P, L)$  – простой, неориентированный, не имеющий петель граф. Например, на рис. 1 показана схема стрелочного перевода, представленного в форме неориентированного графа  $G$ . Рёбра графа характеризуются начальной  $P_i$ , конечной  $P_j$  вершинами и длиной  $L_{ij}$ . Движение поезда из вершины (1) в вершину (4) выполняется по маршруту  $R1$ , который состоит двух полуурейсов, рёбра (1; 2) и (2; 4) образуют острый угол друг с другом. Первый полуурейс выполняется по маршруту {1; 2; 3}. Затем происходит изменение направления движения и поезд движется по маршруту {3; 2; 4}. В таблице оптимальных маршрутов (рис. 2) величина  $\lambda_i$  равна номеру вершины, которая предшествует  $i$ -й, а  $L_{\lambda_i,i}$  – длина ребра между вершинами  $\lambda_i$  и  $i$ .

Поиск оптимального маршрута из вершины (1) в вершину (4) с использованием простого неориентированного графа приведёт к получению ошибочного маршрута движения поезда с поворотом на стрелочном переводе из-за расположения рёбер (1; 2) и (2; 4) под острым углом относительно друг друга. При движении локомотива или маневровой подачи из вершины (1) в вершину (2) необходимо на практике совершить «угловой заезд» – маневровую операцию с вытягиванием на путь (2; 3) с последующим изменением направления движения в сторону вершины (4). Таким образом, использование графа, в котором не учитывается ограничение на включение в оптимальный путь двух соседних рёбер, расположенных под острым углом относительно друг друга, не позволяет планировать корректные маршруты движения локомотивов и маневровых составов в составе имитационных моделей и информационных систем. В таком случае необходимо либо преобразовывать исходный граф, описывающий схему путевого развития, с последующим использованием известных методов поиска кратчайших путей на таком преобразованном графе, либо разрабатывать новый алгоритм поиска оптимальных путей, учитывающий ограничение на величину угла между ребрами графа. В данном исследовании мы выбрали первый вариант, позволяющий использовать для оптимизации графа любые известные методы.

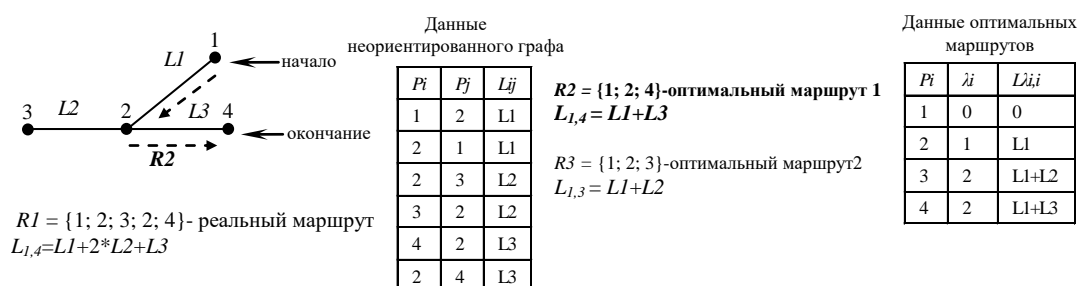


Рис. 2. Традиционный способ описания железнодорожного стрелочного перевода в виде части графа маршрутизации

Fig. 2. Traditional way of representing a railway switch as a part of the routing graph



**Двухвершинный граф с соединёнными биективными вершинами.** Двухвершинный граф  $D(G, P^0)$  состоит из обычного графа  $G$  и его биективными (дублирующими) отображениями вершин  $P^0$  [18]. У каждой вершины есть один дубликат, её биективное отображение (вершина). Вершина и её биективная вершина образуют пару без ребра между ними, такая пара называется соединёнными вершинами. Одна пара вершин соединена с другой парой ребром графа (рис. 3).

На рис. 3 показан пример двухвершинного графа с соединёнными биективными вершинами. Рёбра графа характеризуются начальной парой вершин  $P_i$  и  $P_i^0$ , конечной парой вершин  $P_j$ ,  $P_j^0$  и длиной  $L_{ij}$ . Движение поезда из вершины (1) в вершину (4) выполняется по маршруту  $R1$ , который состоит из двух полурейсов, а рёбра  $(1^0; 2^0)$  и  $(2; 4)$  образуют острый угол друг с другом. Первый полурейс выполняется по маршруту  $\{5^0; 1^0; 2^0; 3^0\}$ . Затем происходит изменение направления движения и поезд движется по маршруту  $\{3; 2; 4; 6\}$  (второй полурейс). Блокирование поворота поезда осуществляется выполнением «правила пути» – поезд до начала движения должен переместиться в вершину – дубликат (биективную вершину)  $P_i$ ,  $P_i^0$ , затем начать своё движение по ребру  $L_{ij}$  [17].

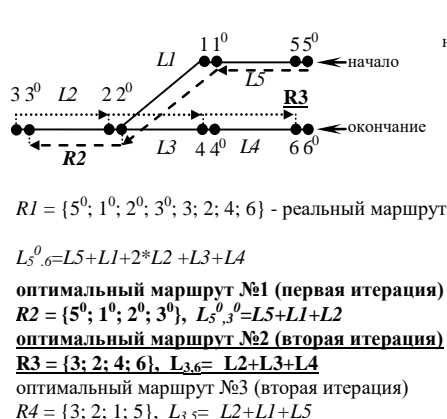
Использование данного правила позволит отслеживать направление движения поезда и исключить (блокировать) его угловой заезд при формировании маршрута. Например, поезд, который начинает движение в вершине (1), должен двигаться вправо по направлению к биективной вершине ( $1^0$ ), в то время как поезд, который начинает движение в вершине ( $1^0$ ), должен двигаться влево по направлению к вершине (1). Найденный маршрут второго полурейса  $\{3; 2; 4; 6\}$  из вершины (3) в вершину (6) не входит в состав оптимального маршрута  $R2$ . Поэтому для изменения направления движения поезда и его движения по второму полурейсу необходимо выполнить дополнительную итерацию по поиску оптимального пути от начальной вершины (3).

Рассмотрим вариант определения оптимального маршрута, в состав которого входит железнодорожный

путь, используемый для смены направления движения поезда. Предположим, что вершина (3) идентифицирована как место остановки поезда для смены направления его движения (рис. 4). В данном варианте вершина (3) является начальной, а её биективная вершина ( $3^0$ ) – конечной. Поиск оптимальных маршрутов движения поезда происходит параллельно из вершин ( $5^0$ ) и (3). Из вершины ( $5^0$ ) до вершины ( $3^0$ ) для первого полурейса, из вершины (3) до вершины (6) для второго полурейса. Полученные полурейсы складываются в маневровый маршрут.

**Рёберный граф.** Пусть  $G(P, L)$  – неориентированный, не имеющий петель простой граф, тогда его рёберный граф –  $L(G)$ . Рёбра графа характеризуются начальной  $P_i$ , конечной  $P_j$  вершинами и длиной  $L_{ij}$  [9]. Рёберный граф  $L(G)$  – это преобразованный простой граф таким образом, что любая вершина графа  $L(G)$  представляет ребро графа  $G$ , и две вершины графа  $L(G)$  соединены ребром в том случае, если соответствующие рёбра графа  $G$  имеют общую вершину. Движение поезда из вершины (4,1) в вершину (2,1) выполняется по маршруту  $R1$ , который состоит из двух полурейсов (рис. 5). Первый полурейс выполняется по маршруту  $\{(4,1); (1,3)\}$ . Затем происходит изменение направления движения и поезд движется по маршруту  $\{(1,3); (2,1)\}$ .

Основными ограничениями использования рёберного графа при описании железнодорожной станции является невозможность корректного определения длин ребер, расположенных под острым углом относительно друг друга. На рис. 5 показаны оптимальные маршруты на рёберном графе  $L(G)$  при условии, если  $L5 < L1 + L3$  или  $L5 > L1 + L3$ . В первом случае оптимальный маршрут  $R2$  содержит рёбра графа  $G$ , которые расположены под острым углом друг относительно друга. Рёберный граф потенциально может использоваться при формировании маневрового маршрута, состоящего из нескольких полурейсов при соблюдении условия  $L5 > L1 + L3$ . В данном случае в состав оптимального маршрута  $R3$  входит железнодорожный путь, используемый для смены направления движения поезда.



Данные неориентированного графа

$P_i$	$P_j$	$L_{ij}$
1	5	L5
5 <sup>0</sup>	1 <sup>0</sup>	L5
2	1	L1
1 <sup>0</sup>	2 <sup>0</sup>	L1
3	2	L2
2 <sup>0</sup>	3 <sup>0</sup>	L2
2	4	L3
4 <sup>0</sup>	2 <sup>0</sup>	L3
4	6	L4
6 <sup>0</sup>	4 <sup>0</sup>	L4

Данные оптимальных маршрутов первая итерация (нач. верш. 5<sup>0</sup>)

$P_i$	$i_i$	$L_{i,i}$
1	1	нет маршрута
1 <sup>0</sup>	5 <sup>0</sup>	L5
2	2	нет маршрута
2 <sup>0</sup>	1 <sup>0</sup>	L5+L1
3	3	нет маршрута
3 <sup>0</sup>	2 <sup>0</sup>	L5+L1+L2
4	4	нет маршрута
4 <sup>0</sup>	4 <sup>0</sup>	нет маршрута
5	5	нет маршрута
5 <sup>0</sup>	0	0
6	6	нет маршрута
6 <sup>0</sup>	6 <sup>0</sup>	нет маршрута

оптимальный маршрут

$$R0 = R2 + R3 = \{5^0; 1^0; 2^0; 3^0\} + \{3; 2; 4; 6\}, L_{5^0,6} = L5 + L1 + L2 + L2 + L3 + L4$$

Данные оптимальных маршрутов вторая итерация (нач. верш. 3)

$P_i$	$i_i$	$L_{i,i}$
1	2	L2+L1
1 <sup>0</sup>	1 <sup>0</sup>	нет маршрута
2	3	L2
2 <sup>0</sup>	2 <sup>0</sup>	нет маршрута
3	0	0
3 <sup>0</sup>	3 <sup>0</sup>	нет маршрута
4	2	L2+L3
4 <sup>0</sup>	4 <sup>0</sup>	нет маршрута
5	1	L2+L1+L5
5 <sup>0</sup>	5 <sup>0</sup>	нет маршрута
6	4	L2+L3+L4
6 <sup>0</sup>	6 <sup>0</sup>	нет маршрута

Рис. 3. Двухвершинный граф с соединёнными биективными вершинами

Fig. 3. Two-vertex graph with connected bijective vertices



$R1 = \{5^0; 1^0; 2^0; 3^0; 3; 2; 4; 6\}$  - реальный маршрут

$$L_{5^0,6^0} = L5 + L1 + 2 * L2 + L3 + L4$$

$R2 = \{5^0; 1^0; 2^0; 3^0\}$  - оптимальный маршрут для маневрового полурея №1

$$L_{5^0,3^0} = L5 + L1 + L2$$

$R3 = \{5^0; 1^0; 1\}$  - оптимальный маршрут для маневрового полурея №2

$$L_{3,6^0} = L2 + L3 + L4$$

Данные неориентированного графа

$P_i$	$P_j$	$L_{ij}$
1	5	L5
5 <sup>0</sup>	1 <sup>0</sup>	L5
2	1	L1
1 <sup>0</sup>	2 <sup>0</sup>	L1
3	2	L2
2 <sup>0</sup>	3 <sup>0</sup>	L2
2	4	L3
4 <sup>0</sup>	2 <sup>0</sup>	L3
4	6	L4
6 <sup>0</sup>	4 <sup>0</sup>	L4

Данные оптимальных маршрутов

$P_i$	$\lambda_i$	$L_{ii}$
1	2	$L5 + L1 + 2 * L2 + L1$
1 <sup>0</sup>	5 <sup>0</sup>	L5
2	3	$L5 + L1 + 2 * L2$
2 <sup>0</sup>	1 <sup>0</sup>	$L5 + L1$
3	3 <sup>0</sup>	$L5 + L1 + L2 + 0$
3 <sup>0</sup>	2 <sup>0</sup>	$L5 + L1 + L2$
4	2	$L5 + L1 + 2 * L2 + L3$
4 <sup>0</sup>	4	0
5	1	$L5 + L1 + 2 * L2 + L5$
5 <sup>0</sup>	0	0
6	4	$L5 + L1 + 2 * L2 + L3 + L4$

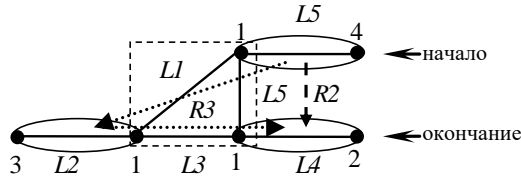
$R5 = \{5^0; 1^0; 2^0; 3^0; 3; 2; 4; 6\}$

- оптимальный маршрут

$$L_{5^0,6^0} = L5 + L1 + 2 * L2 + L3 + L4$$

Рис. 4. Маршруты маневрового состава на двухвершинном графе с начальными вершинами (5<sup>0</sup>) и (3)

Fig. 4. Shunting train routes on a two-vertex graph with initial vertices (5<sup>0</sup>) and (3)



● вершина простого графа  $G$   
 ○ вершина рёберного графа  $L(G)$

$R1 = \{(4,1); (1,3); (1,2)\}$  - реальный маршрут

$$L_{(4,1),(2,1)} = L1 + L3$$

$R2 = \{(4,1); (2,1)\}$  - оптимальный маршрут при условии  $L5 < L1 + L3$

$$L_{(4,1),(2,1)} = L5$$

$R3 = R1 = \{(4,1); (1,3); (2,1)\}$  - оптимальный маршрут при условии  $L5 > L1 + L3$

$$L_{(4,1),(2,1)} = L1 + L3$$

Данные графа

$P_i$	$P_j$	$L_{ij}$
(4,1)	(1,3)	L1
(1,3)	(4,1)	L1
(1,3)	(2,1)	L3
(2,1)	(1,3)	L3
(4,1)	(2,1)	L5
(2,1)	(4,1)	L5

Данные оптимальных маршрутов при условии  $L5 < L1 + L3$

$P_i$	$\lambda_i$	$L_{ii}$
(4,1)	0	0
(1,3)	(4,1)	L1
(2,1)	(4,1)	L5

Данные оптимальных маршрутов при условии  $L5 > L1 + L3$

$P_i$	$\lambda_i$	$L_{ii}$
(4,1)	0	0
(1,3)	(4,1)	L1
(2,1)	(1,3)	$L1 + L3$

Рис. 5. Представление железнодорожного стрелочного перевода в виде дуг рёберного графа

Fig. 5. Representation of railroad switches as arcs of an edge graph

**Ограничения существующих способов формирования графа железнодорожной станции.** Проведённый анализ способов формирования графа железнодорожной станции показывает различную адаптивность их использования при оптимизации маневровых передвижений на железнодорожной станции. Потенциал использования простого графа при формировании маневрового маршрута ограничен наличием рёбер, образующих острый угол друг с другом, что приводит к формированию маневровых маршрутов, которые противоречат технологии работы железнодорожной станции.

Попытки учесть в имитационных моделях особенности этой технологии с использованием двухвершинного графа с соединёнными биактивными вершинами позволили исключить разворот поезда на стрелочном переводе. С другой стороны, блокирование разворота поезда привело к формированию в мо-

дели только простых однонаправленных маршрутов, что не позволяет корректно использовать методы поиска оптимальных путей на графах.

В рёберном графе железнодорожный стрелочный перевод представляется тремя вершинами, соединёнными между собой тремя условными рёбрами, показывающими связи между ребрами исходного графа. Корректное движение поезда в модели по стрелочному переводу, описанному реберным графом, возможно при соблюдении дополнительного условия, учёт которого усложняет модель и снижает её эффективность.

Вычислительная эффективность имитационных моделей, в которых применяются проанализированные способы описания схемы путевого развития, снижается по мере усложнения как схемы путевого развития, так и вариантов маневровых операций. Это связано с увеличением алгоритмической сложности использования методов оптимизации из-за необходи-

мости соблюдения дополнительных условий, отслеживания направлений движения и длин поезда, а также выполнения расчетов по преобразованию оценок ребер исходного графа.

**Предлагаемый двухвершинный граф с раздельными биективными вершинами и рёбрами.** Разработанный нами способ представления схемы путевого развития железнодорожной станции в составе имитационной модели основан на использовании двухвершинного графа раздельными биективными вершинами и рёбрами. Такой граф позволяет находить кратчайшие пути с дополнительным ограничением на углы между ребрами с использованием любых известных методов без необходимости выполнения промежуточных преобразований в процессе оптимизации. Применительно к технологии работы железнодорожного транспорта предлагаемый граф позволяет рассчитывать оптимальные маневровые маршруты, состоящие из нескольких полурейсов (рис. 6).

Основная идея предлагаемого графа заключается в построении неориентированного, не имеющего петель двухвершинного графа  $D(G, P^0, L^0)$  со множеством биективных отображений вершин  $P^0$  и рёбер  $L^0$ .

Каждому стрелочному переводу ставится в соответствие две вершины графа. Вершина (2) и её биективная вершина ( $2^0$ ) образуют раздельную пару вершин без ребра между ними. Железнодорожные пути, которые образуют острый угол друг с другом, отображаются двумя рёбрами графа. Ребро  $L1$  и его биективное отображение  $L1^0$  образуют пару с общей биективной вершиной ( $2^0$ ), а ребро  $L3$  и его биективное отображение  $L3^0$  образуют пару с общей вершиной (2). Железнодорожные пути, которые не образуют острый угол с другими путями, отображаются ребром и его тремя биективными отображениями таким образом, чтобы вершины графа и их биективные отображения не были соединены рёбрами. Ребро  $L2$  соединяет вершины (2) и (3), биективными рёбрами являются ребра ( $2^0, 3^0$ ), ( $2^0, 3$ ) и ( $2, 3^0$ ), в состав ограничивающих вершин которых входит биективная вершина графа [14]. В результате описанного одно-

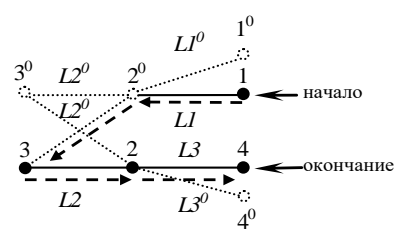
кратного преобразования исходного графа путевого развития появляется возможность поиска кратчайшего пути (маршруты) известными методами. В примере таким маршрутом будет  $R1 = \{1; 2^0; 3; 2; 4\}$ .

Предлагаемое представление путевого развития железнодорожной станции позволяет отказаться от использования в имитационной модели дополнительных правил и исключений для отслеживания направления движения поезда. Направление движения маневрового состава в модели определяется автоматически, на основании сформированного оптимального маневрового маршрута [14].

### Полученные результаты и их обсуждение

Оценка работоспособности алгоритма поиска оптимальных путей на предлагаемом двухвершинном графе с раздельными биективными вершинами и рёбрами проводилась в два этапа. На первом этапе рассмотрен пример движения поезда по путям условной железнодорожной станции с простой схемой путевого развития (рис. 7). В примере решалась задача проверки возможности поиска оптимального и корректного маршрута движения поезда с пути №1 на путь №3. Кроме того, выполнено сравнение эффективности предлагаемого способа описания схемы путевого развития с тремя известными: простым и рёберным графами, двухвершинным графом с соединёнными биективными вершинами.

Движение поезда с пути №1 на путь №3 выполняется по маршруту, который состоит из двух полурейсов, а ребра (1; 3) и (2; 3) образуют острый угол друг с другом. Результатом использования алгоритма маршрутизации на простом графе является маршрут  $\{(2; 3), (1; 3), (4; 1)\}$ , в состав которого входят последовательно расположенные пути (2; 3) и (1; 3), образующие острый угол друг с другом. Такой маршрут нарушает требование технологии работы железнодорожного транспорта, поскольку поезд не заезжает на путь (3, 5).



$R1 = \{1; 2^0; 3; 2; 4\}$  - реальный маршрут

$$L_{1,4} = L1 + 2 * L2 + L3$$

Данные графа		
$P_i$	$P_j$	$L_{ij}$
1	$2^0$	L1
$2^0$	1	L1
$1^0$	$2^0$	L1
$2^0$	$1^0$	L1
$3^0$	$2^0$	L2
$2^0$	$3^0$	L2
$2^0$	3	L2
3	$2^0$	L2
$3^0$	2	L2
2	$3^0$	L2
3	2	L2
2	3	L2
2	$4^0$	L3
$4^0$	2	L3
2	4	L3
4	2	L3

Данные оптимальных маршрутов

$P_i$	$\lambda_i$	$L_{\lambda_i}$
$1^0$	0	0
1	0	0
2	3	$L1 + 2 * L2$
$2^0$	1	L1
3	$2^0$	$L1 + L2$
$3^0$	$2^0$	$L1 + L2$
4	2	$L1 + 2 * L2 + L3$
$4^0$	2	$L1 + 2 * L2 + L3$

$R2 = R1 = \{1; 2^0; 3; 2; 4\}$  – оптимальный маршрут №1  
 $L_{1,4} = L1 + 2 * L2 + L3$

$R3 = \{1; 2^0; 3^0\}$  – оптимальный маршрут №2,  $L_{1,4} = L1 + L2$

$R4 = \{1; 2^0; 3; 2; 4^0\}$  – оптимальный маршрут №3,  $L_{1,4} = L1 + 2 * L2 + L3$

Рис. 6. Предлагаемый двухвершинный граф с раздельными биективными вершинами и рёбрами

Fig. 6. Proposed two-vertex graph with disjoint bijective vertices and edges

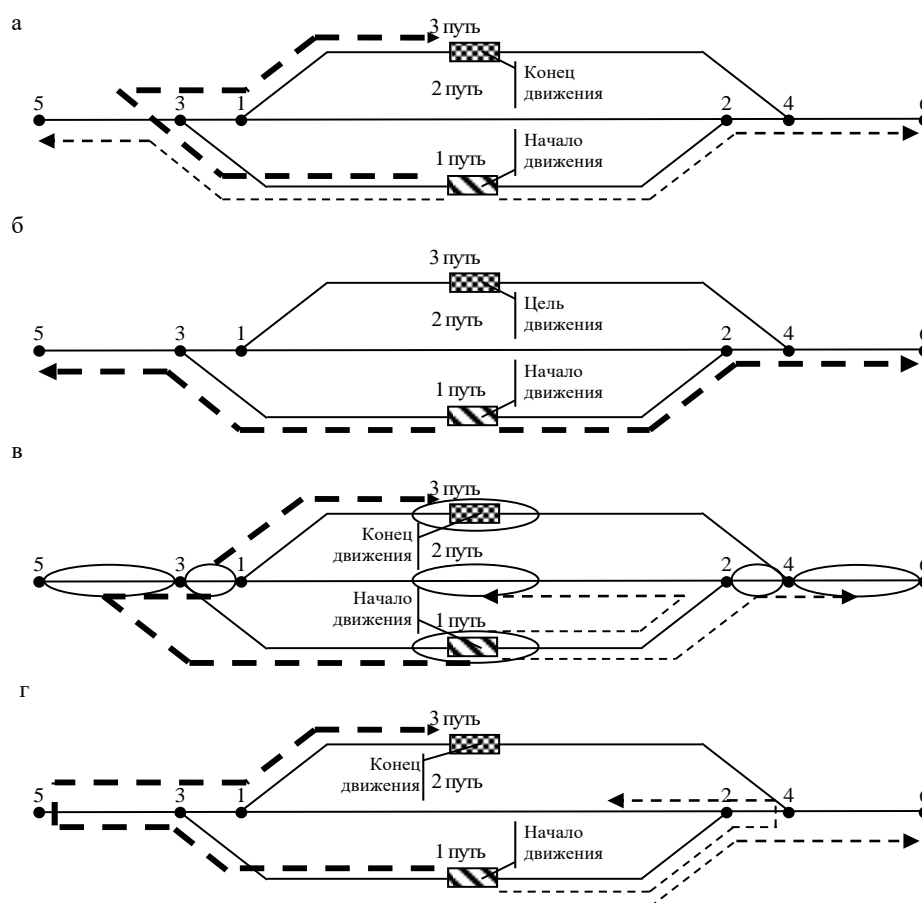


Рис. 7. Варианты оптимальных маршрутов движения поезда по условной железнодорожной станции:

а – простой граф; б – двухвершинный граф с соединенными биективными вершинами; в – рёберный граф; г – разработанный двухвершинный граф с разделёнными биективными вершинами и рёбрами

Fig. 7. Variants of optimal routes of train movement along the conditional railway station: а is simple graph; б is two-vertex graph with connected bijective vertices; в is edge graph; г is developed two-vertex graph with separated bijective vertices and edges

Маршруты, сформированные с использованием двухвершинного графа с соседними биективными вершинами, определяются в имитационной модели на AnyLogic согласно «правилу пути» [17], которое блокирует смену направления поезда и заезд на путь (1, 3). В результате определения оптимальных путей получаем, что путь назначения (путь №3) не входит в состав оптимального маршрута, что некорректно отображает реальную работу станции.

Результатом использования алгоритма маршрутизации на рёберном графе является маршрут  $\{(2; 3), (3; 5), (1; 3), (4; 1)\}$  при выполнении условия наибольшей оценки ребра, связывающего железнодорожные пути (2; 3) и (1; 3). Согласно технологии, поезд при смене направления движения на пути (3; 5) заезжает на этот путь, останавливается и далее начинает движение в обратном направлении. Однако путь (3; 5) добавляется только один раз в оптимальный маршрут, рассчитанный с использованием рёберного графа, хотя по технологии поезд должен двигаться по пути (3; 5) два раза – сначала в прямом направлении, затем в обратном.

Поиск оптимальных путей с использованием разработанного двухвершинного графа с разделёнными биективными вершинами и рёбрами показывает корректный и лучший результат. Направление движения поезда определяется автоматически в зависимости от сформированного оптимального маневрового маршрута  $\{(2; 3), (3; 5), (3; 5), (1; 3), (4; 1)\}$  [14]. Оптимальный маршрут включает в себя пути, не образующие острый угол с соседними путями, а также обеспечивает двойное последовательное прохождение поездом в модели путей, необходимых для смены направления.

На втором этапе исследования проводилась оценка эффективности использования разработанного двухвершинного графа с разделёнными биективными вершинами и рёбрами в составе имитационной модели работы промышленной железнодорожной станции крупного горнодобывающего предприятия. Результаты проведённых экспериментов на построенной имитационной модели показали принципиальные особенности формирования разработанного двухвер-

шинного графа и маршрута поезда. Выявлены два варианта формирования транспортной сети железнодорожной станции в зависимости от расположения соседних биективных вершин – с симметричным расположением соседних биективных вершин относительно друг друга (рис. 8) и асимметричным расположением таких вершин (рис. 9).

Результаты проведённых экспериментов на имитационной модели показывают гибкость и универсаль-

ность использования разработанного двухвершинного графа при решении задачи оптимизации перевозок на железнодорожной станции для всех возможных схем путевого развития. Результатом применения эвристического алгоритма поиска оптимальных путей с использованием разработанного двухвершинного графа являются все возможные корректные варианты маршрутов движения поезда (рис. 10) [14].

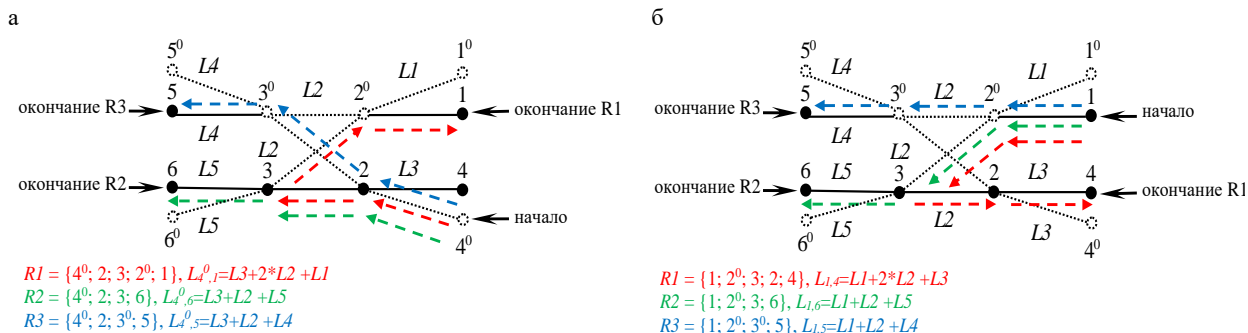


Рис. 8. Схемы маневровых маршрутов при симметричном расположении биективных вершин в разработанном двухвершинном графе: а – начало движения поезда – биективная вершина ( $4^0$ ); б – начало движения поезда – вершина (1)  
Fig. 8. Diagrams of shunting routes at symmetric arrangement of bijective vertices in the developed two-vertex graph: а is train movement start – bijective vertex ( $4^0$ ); б is train movement start - vertex (1)

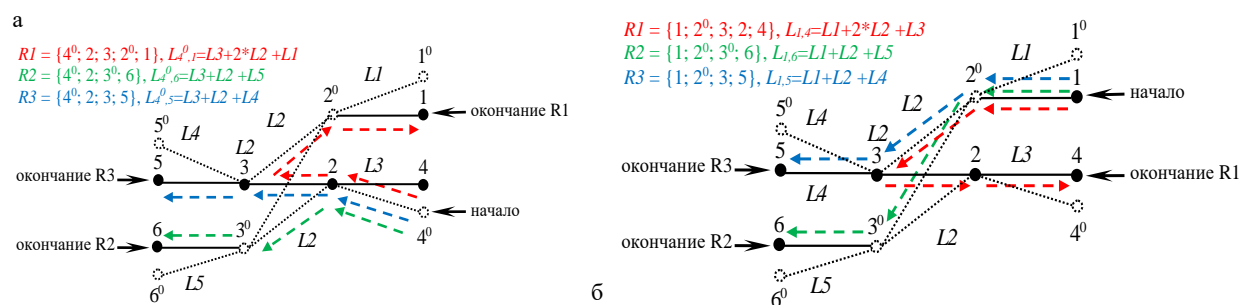
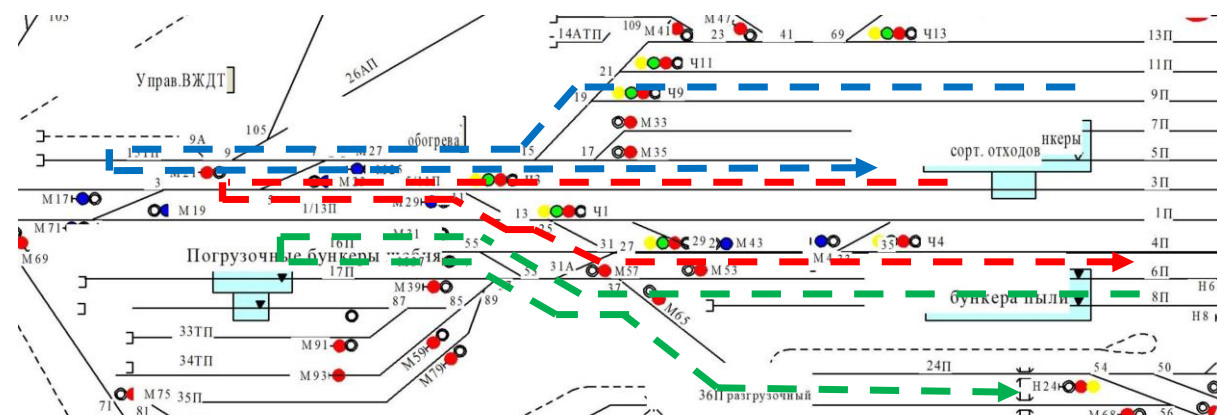


Рис. 9. Схемы маневровых маршрутов при асимметричном расположении биективных вершин в разработанном двухвершинном графе: а – начало движения поезда – биективная вершина ( $4^0$ ); б – начало движения поезда – вершина (1)  
Fig. 9. Diagrams of shunting routes at asymmetric arrangement of bijective vertices in the developed two-vertex graph: а is train movement start – bijective vertex ( $4^0$ ); б is train movement start – vertex (1)





Оценка сокращения затрат времени диспетчером на планирование маневровых перемещений по железнодорожной станции в случае применения предлагаемого двухвершинного графа и алгоритма его оптимизации составляет до 25–30%. Кроме этого эффекта, появляется возможность использовать результаты оптимизации для генерации вариантов управленческих решений с последующей оценкой их результативности и выбора наилучшего варианта.

### Заключение

Автоматизация процесса выработки решений по согласованной работе транспорта с остальными подразделениями горнодобывающего предприятия в режиме реального времени составляет основу цифровизации железнодорожных путей необщего пользования. В настоящее время известно множество алгоритмов решения задачи маршрутизации на графах, которые активно применяются как при планировании, так и при управлении перевозками в режиме реального времени. Адаптивность таких алгоритмов достигается использованием различных способов представления железнодорожной инфраструктуры в виде графов.

Выполненный анализ существующих методов формирования графов для железнодорожных перевозок позволяет говорить о преимуществах специализированных двухвершинных и рёберных графов железнодорожной станции. Однако потенциал использования представленных графов при цифровизации железнодорожных перевозок снижается по мере усложнения схем путевого развития и увеличения вариантов последовательностей маневровых операций при планировании работы железнодорожной станции. Это связано с увеличением алгоритмической сложности использования методов оптимизации графов из-за необходимости соблюдения дополнительных условий, ограничений и исключений, связанных с направлением движения и длиной поездов в имитационной модели станции.

Предложенный в работе новый способ формирования двухвершинного графа расширяет адаптивность использования методов оптимизации в имитационных моделях железнодорожных станций. Способ обеспечивает моделирование движения поездов по длинным маршрутам между любыми двумя железнодорожными путями без необходимости использования дополнительных правил и исключений, что увеличивает вычислительную эффективность имитационной модели и делает её пригодной для использования в режиме реального времени. Результаты проведённых экспериментов на имитационной модели показывают гибкость и универсальность использования разработанного двухвершинного графа с отдельными биективными вершинами и рёбрами при решении задачи оптимизации перевозок на железнодорожной станции для всех возможных схем путевого развития станций.

Будущие исследования направлены на оценку эффективности использования предлагаемого двухвершинного графа в качестве исходных данных для пространственно-временной оптимизации перевозочного процесса.

### Выводы

1. Представлено описание способа цифровизации железнодорожных перевозок на путях необщего пользования горнодобывающих предприятий, основанного на использовании имитационных моделей в режиме реального времени для оценки вариантов решений по управлению технологией перевозочного процесса.

2. Показано, что основным ограничением на использование имитационных моделей в оперативном режиме являются недостатки существующих графовых способов описания разветвлённых схем путевого развития промышленных железнодорожных станций со сложной маневровой работой.

3. Предложен новый математический объект – двухвершинный граф с отдельными биективными вершинами, особенностью которого является учёт величины угла между рёбрами графа. Данная особенность позволяет корректно описывать в имитационной модели железнодорожные стрелочные переводы. Кроме того, использование предложенного графа обеспечивает эффективный поиск оптимальных (кратчайших) путей известными методами без необходимости выполнения дополнительных вычислений для корректного моделирования маршрутов движения поездов по путям железнодорожной станции.

4. Доказана универсальность описания путевого развития железнодорожных станций разработанным двухвершинным графом с отдельными биективными вершинами для формирования транспортной сети железнодорожных перевозок на примере промышленной железнодорожной станции горнодобывающего предприятия со сложной схемой путевого развития.

5. Результаты исследования рекомендуют использовать при построении имитационных моделей как основного инструмента цифровизации процесса управления железнодорожными перевозками на путях необщего пользования, а также при построении высокоточных имитационных моделей железнодорожных станций.

### Список источников

1. Kalinowski T., Matthews J., Waterer H. Scheduling of maintenance windows in a mining supply chain rail network // *Computers & Operations Research*. 2020, vol. 115, 104670. DOI: 10.1016/j.cor.2019.03.016.
2. Mining and Technical System Sustainable Development Strategy Selection Using MABAC Method / K.V. Burmistrov, S.E. Gavrishchev, N.A. Osintsev, I.A. Pytalev // *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2021, vol. 4, no. 1, pp. 268–283.
3. A comprehensive interdisciplinary review of mine supply chain management / L. Zeng, S.Q. Liu, E. Kozan [и др.] // *Resources Policy*. 2021, vol. 74, 102274.
4. Radebe, N. Mining industry risks, and future critical minerals and metals supply chain resilience in emerging markets / N. Radebe, N. Chipangamate // *Resources Policy*. 2024, vol. 91, 104887.
5. Digital Transformation: a Prerequisite and Foundation for Sustainable Development of Mining Operations / M.V. Rylnikova, K.I. Strukov, D.N. Radchenko, E.N. Esina // *Mining Industry Journal*. 2021, no. 3, pp. 74–78.

6. Hypotheses on optimization of mining systems operating parameters using predictive analytics / V.N. Zakharov, M.V. Rynnikova, D.A. Klebanov, D.N. Radchenko // *Mining Industry Journal*. 2023, no. 5, pp. 38-42.
7. Mannhardt F., Landmark A.D. Mining railway traffic control logs // *Transportation Research Procedia*. 2019, vol. 37, pp. 227-234.
8. Setyaji A., Pamursari N., Sari N. Traffic Capacity Analysis of Existing Conditions with the Effect of Additional Coal Transportation Targets on The Tanjung Enim – Tarahan Railway Line // *Journal of Science and Applicative Technology*. 2024, vol. 8, no. 1, p. 15.
9. Digital Twins: State-of-the-Art and Future Directions for Modeling and Simulation in Engineering Dynamics Applications / D.J. Wagg, K. Worden, R.J. Barthorpe, P. Gardner // *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering*. 2020, vol. 6, no. 3, 030901.
10. Simulation models in digital twins of railway junctions / A.N. Rakhmangulov, S.N. Kornilov, P.N. Mishkurov, D.V. Alexandrin // *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2022. №3. С.43-59.
11. Александров А.Э., Сурин А.В., Шипулин А.В. Использование имитационных моделей в оперативном планировании поездной работы // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2015. Т. 4, №60. С. 65-72.
12. Колокольников В.С., Слободянюк И.Г. Технология макромоделирования полигонов // *Транспорт Урала*. 2019. Т.3, №62. С.48-51.
13. Шмелевич М.И., Стариков А.Е. Особенности нормирования маневровой работы в имитационной модели станции // *Мир транспорта*. 2015. Т.5, №60. С.198-212.
14. Мишкuroв П.Н., Рахмангулов А.Н., Фридрихсон О.В. Методика формирования транспортной сети железнодорожной станции // *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. 2021. Т. 3, №51. С.50-64.
15. Völz W.-D. Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten spurgeführter Verkehrssysteme mittels Graphentheorie: Vorträge der Jahrestagung 1977 / *Papers of the Annual Meeting 1977 DGOR. – Heidelberg: Physica-Verlag HD*, 1978, pp. 440-449.
16. Aliakbari M., Geunes J., Sullivan K.M. The single train shortest route problem in a railyard // *Optimization Letters*. 2021, vol. 15, no. 8, pp. 2577-2595.
17. Markus Montigel. Time-triggered exchange of train route data between train control systems // *Computers in Railways VIII: WIT Press*, 2002. Pp. 33-41.
18. Montigel M. Formal Representation of Track Topologies by Double Vertex Graphs // *Computers in Railways III: Proceedings of the Third International Conference on Computer Aided Design, Manufacture, and Operation in the Railway and Other Advanced Mass Transit Systems (Comprail 92): Computers in Railways III: WIT Press*, 1992. C. 359-370.
19. Gillett B.E., Miller L.R. A Heuristic Algorithm for the Vehicle-Dispatch Problem // *Operations Research*. 1974, vol. 22, no. 2, pp. 340-349.
20. Schedit M. Proposal For a Railway Layer Model // *COMPRAIL 2018: Computers in Railways XVI : Railway Engineering Design and Operation: WIT Press* Southampton UK, 2018, pp. 157-168.
21. Development of a railway junction simulator for evaluation of control strategies and capacity utilization optimization / S. Shekhar, A. Singh, M.N. Belur, N. Rangaraj // 2019 Fifth Indian Control Conference (ICC): 2019 Fifth Indian Control Conference (ICC): IEEE, 2019. Pp. 260-265.
22. Edge-locating coloring of graphs / M. Korivand, D.A. Mojdeh, E.T. Baskoro, A. Erfanian // *Electronic Journal of Graph Theory and Applications*. 2024, vol. 12, no. 1, p. 55.
23. Aliakbari M., Geunes J. Multiple Train Repositioning Operations in a Railyard Network // *Operations Research Forum*. 2022, vol. 3, no. 4, p. 61.
24. Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software / S. Abar, G.K. Theodoropoulos, P. Lemariner, G.M. O'Hare // *Computer Science Review*. 2017, vol. 24, pp. 13-33.
25. Разработка имитационной дискретно-событийной модели транспортной инфраструктуры с использованием инструментов оптимизации / Кузьмин Д.В., Багинова В.В., Краснобаев Д.А., Мусатов Д.В. // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2023. Т.17, №2. С. 42-48.
26. Мишкuroв П.Н., Рахмангулов А.Н. Особенности построения агентной имитационной модели железнодорожной станции // *Современные проблемы транспортного комплекса России*. 2021. Т.11, №1. С. 29-40.

## References

1. Kalinowski T., Matthews J., Waterer H. Scheduling of maintenance windows in a mining supply chain rail network. *Computers & Operations Research*. 2020;115:104670. DOI: 10.1016/j.cor.2019.03.016.
2. Burmistrov K.V., Gavrishev S.E., Osintsev N.A., Pytalev I.A. Mining and Technical System Sustainable Development Strategy Selection Using MABAC Method. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2021;4(1):268-83. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-4-1-268-283.
3. Zeng L., Liu S.Q., Kozan E., et al. A comprehensive interdisciplinary review of mine supply chain management. *Resources Policy*. 2021;74:102274. DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102274.
4. Radebe N., Chipangamate N. Mining industry risks, and future critical minerals and metals supply chain resilience in emerging markets. *Resources Policy*. 2024;91:104887. DOI: 10.1016/j.resourpol.2024.104887.
5. Rynnikova M.V., Strukov K.I., Radchenko D.N., Esina E.N. Digital Transformation: a Prerequisite and Foundation for Sustainable Development of Mining Operations. *Mining Industry Journal*. 2021;(3):74-8. DOI: 10.30686/1609-91922021-3-74-78.
6. Zakharov V.N., Rynnikova M.V., Klebanov D.A., Radchenko D.N. Hypotheses on optimization of mining systems operating parameters using predictive analytics. *Mining Industry Journal*. 2023;(5):38-42. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-5-38-42.
7. Mannhardt F., Landmark A.D. Mining railway traffic control logs. *Transportation Research Procedia*. 2019;37:227-34. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.187.
8. Setyaji A., Pamursari N., Sari N. Traffic Capacity Analysis of Existing Conditions with the Effect of Additional Coal Transportation Targets on The Tanjung Enim – Tarahan Railway Line. *Journal of Science and Applicative Technology*. 2024;8(1):15. DOI: 10.35472/jsat.v8i1.1753.
9. Wagg D.J., Worden K., Barthorpe R.J., Gardner P. Digital Twins: State-of-the-Art and Future Directions for Modeling and Simulation in Engineering Dynamics Applications. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineer-*

- ing Systems, Part B: Mechanical Engineering. 2020;6(3):030901. DOI: 10.1115/1.4046739.
10. Rakhmangulov A.N., Kornilov S.N., Mishkurov P.N., Alexandrin D.V. Simulation models in digital twins of railway junctions. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2022;(3):43-59. DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-43-59.
  11. Aleksandrov A.E., Surin A.V., Shipulin A.V. The use of simulation models in operational planning of train operations. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya*. 2015;4(60):65-72. (in Russ.).
  12. Kolokol'nikov V.S., Slobodyanyuk I G. Technology of polygons macromodelling. *Transport Urala*. 2019;3(62):48-51. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-3-48-51. (in Russ.).
  13. Shmulevich M.I., Starikov A.E. Osobennosti normirovaniya manevrovoy raboty v imitacionnoy modeli stancii. *Mir transporta*. 2015;5(60):198-212. (in Russ.).
  14. Mishkurov P.N., Rakhmangulov A.N., Fridrihson O.V. Methodology of forming the transport network of a railway station. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Herald of the Ural State University of Railway Transport]. 2021;3(51):50-64. DOI: 10.20291/2079-0392-2021-3-50-64. (in Russ.).
  15. Völz W-D. Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten spurgeführter Verkehrssysteme mittels Graphentheorie. *Vorträge der Jahrestagung 1977 / Papers of the Annual Meeting 1977 DGOR*. Heidelberg: Physica-Verlag HD; 1978, p. 440-449.
  16. Aliakbari M., Geunes J., Sullivan K.M. The single train shortest route problem in a railyard. *Optimization Letters*. 2021;15(8):2577-95. DOI: 10.1007/s11590-021-01761-w.
  17. Montigel M. Time-triggered exchange of train route data between train control systems. *Computers in Railways VIII*: WIT Press; 2002, p. 33-41. Online verfügbar unter <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:107640905>.
  18. Montigel M. Formal Representation of Track Topologies by Double Vertex Graphs, *Computers in Railways III*. Washington, DC, U.S.A., 18-20 August, WIT Press, 1992, pp. 359-370.
  19. Gillett B.E., Miller L.R. A Heuristic Algorithm for the Vehicle-Dispatch Problem. *Operations Research*. 1974;22(2):340-9. DOI: 10.1287/opre.22.2.340.
  20. Schedit M. Proposal For a Railway Layer Model. *COMPRAIL 2018: Computers in Railways XVI : Railway Engineering Design and Operation*. Lisbon, Portugal, 02.07.2018 - 04.07.2018, WIT PressSouthampton UK; 2018, p. 157-68.
  21. Shekhar S., Singh A., Belur M.N., Rangaraj N. Development of a railway junction simulator for evaluation of control strategies and capacity utilization optimization. *2019 Fifth Indian Control Conference (ICC)*. New Delhi, India, 09.01.2019 - 11.01.2019, IEEE; 2019, p. 260-5.
  22. Korivand M., Mojdeh D.A., Baskoro E.T., Erfanian A. Edge-locating coloring of graphs. *Electronic Journal of Graph Theory and Applications*. 2024;12(1):55. DOI: 10.5614/ejgta.2024.12.1.6.
  23. Aliakbari M., Geunes J. Multiple Train Repositioning Operations in a Railyard Network. *Operations Research Forum*. 2022;3(4):61. DOI: 10.1007/s43069-022-00171-7.
  24. Abar S., Theodoropoulos G.K., Lemarini P., O'Hare G.M. Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software. *Computer Science Review*. 2017;24:13-33. DOI: 10.1016/j.cosrev.2017.03.001.
  25. Kuzmin D.V., Baginova V.V., Krasnobaev D.A., Musatov D.V. Development of a discrete-event simulation model of transport infrastructure using optimization tools. *T-Comm: Telekommunikacii i transport*. 2023;17(2):42-48. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-2-42-48. (in Russ.).
  26. Mishkurov P.N., Rakhmangulov A.N. Construction Features of Railway Station Agent-based Simulation Model. *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii* [Modern Problems of Russian Transport Complex]. 2021;11(1):29-40. (in Russ.).

Поступила 09.12.2024; принята к публикации 10.02.2025; опубликована 30.06.2025  
Submitted 09/12/2024; revised 10/02/2025; published 30/06/2025

**Мишкuroв Павел Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры логистики и управления транспортными системами, институт горного дела и транспорта, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: p.mishkurov@magtu.ru. ORCID 0000-0001-9886-0575

**Рахмангулов Александр Нельевич** – доктор технических наук, профессор кафедры логистики и управления транспортными системами, институт горного дела и транспорта, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: ran@magtu.ru. ORCID 0000-0001-7862-4743

**Pavel N. Mishkurov** – PhD (Eng.), Associate Professor, Department of Logistics and Transportation Systems Management, Institute of Mining and Transport, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: p.mishkurov@magtu.ru. ORCID 0000-0001-9886-0575

**Aleksandr N. Rakhmangulov** – DrSc (Eng.), Professor, Department of Logistics and Transportation Systems Management, Institute of Mining and Transport, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: ran@magtu.ru. ORCID 0000-0001-7862-4743

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-18-27



## СНИЖЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ВЫНОСА КРЕМНИЙСОДЕРЖАЩИХ МИНЕРАЛОВ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД В КОНЦЕНТРАТ ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Арабаджи Я.Н.<sup>1</sup>, Орехова Н.Н.<sup>2</sup>, Тюленев А.Ю.<sup>3</sup>, Баранова Л.П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уральская горно-металлургическая компания, Верхняя Пышма, Россия

<sup>2</sup>Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия

<sup>3</sup>АО «Сибирь-Полиметаллы», Рубцовск, Россия

**Аннотация.** Обеспечение эффективности и стабильности переработки полиметаллических руд является актуальной задачей, которая усложняется сложностью вещественного состава руд, снижением содержаний металлов и тонкой вкрапленностью минералов. Целью исследования являлось определение относительной значимости изменения плотности пульпы, расхода воздуха и скорости вращения импеллера при совокупном воздействии в контексте их влияния на снижение механического выноса тонких частиц нерудных минералов, а также установление границ регулирования их значений в цинковом цикле флотации полиметаллических руд. Снижение содержания минералов вмещающих пород в кондиционном цинковом концентрате необходимо для уменьшения стоимости его металлургической переработки. В работе оценён вклад механического выноса кремнийсодержащих минералов в снижение качества пенного продукта цинкового цикла флотации полиметаллической руды. Проведёнными исследованиями определён рабочий диапазон оптимальных режимных параметров технологического процесса, обеспечивающий эффективность флотации сфалерита при минимизации извлечения диоксида кремния в концентрат. Экспериментально выявлено негативное влияние чрезмерного снижения каждого из регулируемых параметров. Математической обработкой результатов полного факторного эксперимента получено уравнение регрессии, адекватно описывающее взаимосвязь между управляемыми параметрами технологического процесса и коэффициентом механического выноса нерудных минералов, что позволяет более точно прогнозировать результаты при изменении условий флотации. Установлено, что наиболее значимым фактором является расход воздуха. Обоснованные решения по оптимизации режимных параметров действующего производства при практической адаптации результатов на первоначальном этапе позволили снизить массовую долю диоксида кремния в цинковом концентрате на 15,66% относительно исходного уровня.

**Ключевые слова:** коэффициент механического выноса, цинковая флотация, оптимальные режимные параметры, диоксид кремния, расход воздуха, плотность пульпы, скорость вращения импеллера

© Арабаджи Я.Н., Орехова Н.Н., Тюленев А.Ю., Баранова Л.П., 2025

### Для цитирования

Снижение механического выноса кремнийсодержащих минералов вмещающих пород в концентрат путем оптимизации режимных параметров технологического процесса / Арабаджи Я.Н., Орехова Н.Н., Тюленев А.Ю., Баранова Л.П. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 18-27. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-18-27>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



# REDUCTION OF MECHANICAL ENTRAINMENT OF SILICA-BEARING GANGUE MINERALS TO CONCENTRATE BY OPTIMIZING THE OPERATING PARAMETERS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS

Arabadzhi Ya.N.<sup>1</sup>, Orekhova N.N.<sup>2</sup>, Tyulenev A.Yu.<sup>3</sup>, Baranova L.P.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ural Mining and Metallurgical Company, Verkhnyaya Pyshma, Russia

<sup>2</sup>Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

<sup>3</sup>Siberia-Polymetals, Rubtsovsk, Russia

**Abstract.** Efficient beneficiation of polymetallic ores is an essential issue, which has become more difficult due to the mineral complexity of ores, lower metal grades and fine dissemination of minerals. The purpose of the study was to identify the relative importance of changes in pulp density, airflow rate and impeller speed at their aggregate impact on reduction of the mechanical entrainment of fine gangue mineral particles, and to establish the control limits of their values in the zinc cycle of polymetallic ore flotation. In this study the effect of mechanical entrainment of silica-containing minerals on the reduced quality of froth product of zinc cycle of polymetallic ore flotation was evaluated. The experiments were performed to establish the operating range of optimal process parameters, providing efficient sphalerite flotation and minimizing the extraction of SiO<sub>2</sub> in the concentrate. The negative impact of excessive reduction of each of the controlled parameters has been experimentally revealed. By mathematical processing of the results of the complete factorial experiment the regression equation was obtained, which appropriately describes the correlation between the controlled process parameters and the ratio of mechanical entrainment of gangue minerals that enables more accurate prediction of the results when altering flotation conditions. Airflow rate was found to be the most significant factor. The reasonable decision on streamlining performance parameters of the existing production by implementation of the obtained results provided, at the initial stage, reduction of mass fraction of SiO<sub>2</sub> in zinc concentrate by 15.66% of the initial level.

**Keywords:** ratio of mechanical entrainment, zinc flotation, optimal process parameters, silica, airflow rate, impeller speed

## For citation

Arabadzhi Ya.N., Orekhova N.N., Tyulenev A.Yu., Baranova L.P. Reduction of Mechanical Entrainment of Silica-Bearing Gangue Minerals to Concentrate by Optimizing the Operating Parameters of the Technological Process. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 18-27. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-18-27>

## Введение

Достижение необходимых показателей качества на обогатительных фабриках осложняется поступлением в переработку руд, характеризующихся все более тесным взаимным прорастанием минералов между собой, снижением содержания полезных минералов и, как следствие, неизбежными повышением тонины помола руд перед флотацией и использованием многооперационных схем флотации [1]. В результате эволюции схем обогащения возникает необходимость в постоянной оптимизации технологических процессов для обеспечения их эффективности, стабильности и экономической целесообразности.

Главной целью оптимизации промышленного процесса флотации является достижение более высоких качественно-количественных показателей благодаря усовершенствованию технологических условий.

Эффективное управление параметрами флотационного процесса, наряду с оптимизацией измельчения на основе прогноза возможности селективной дезинтеграции [2], реагентными режимами [3] может быть реализовано посредством автоматического регулирования систем, контролирующих расход, плотность и уровень

пульпы, расход воздуха, толщину пенного слоя и множество других параметров [4].

Авторами ранее было установлено [5], что важным фактором снижения качества пенных концентратов посредством загрязнения компонентами вмещающих пород является их механический вынос, который мало зависит от способности поверхности частиц минералов к взаимодействию с водной средой. Механический вынос – это процесс, при котором мелкие и сверхмелкие частицы переносятся во флотационную пену из верхней части пульпы и в конечном итоге выгружаются в концентрат, даже если они не прикреплены к пузырькам газа [6].

Изучению возможности минимизации механического выноса посвящено большое количество работ, обзор которых представлен в работах [7-11]. Доказано [12], и еще раз подтверждено результатами наших опытов, прямое влияние расхода воздуха на высоту и стабильность пенного слоя в камере флотомшины, что, в свою очередь, также имеет прямое влияние на извлечение сфалерита в пенный продукт и на механический вынос. Проведенный анализ [5] позволил выделить основные параметры технологического процесса, влияющие на него: плотность пульпы, рас-



ход воздуха и скорость вращения импеллера. Как правило, исследования сосредоточены на изучении влияния какого-либо одного из этих параметров и не позволяют оценить сравнительную значимость каждого из них при совокупном воздействии.

Данные параметры приняты в качестве управляемых факторов при проведении лабораторных экспериментов по повышению качества цинкового концентрата, в первую очередь за счет снижения механического выноса примесных минералов вмещающих пород.

Цинк, являясь третьим по объему производства цветным металлом, демонстрирует стабильный спрос, с годовым потреблением в России около 250 тыс. т, и прогнозируется его дальнейший рост.

Согласно стратегии развития металлургии России до 2030 года [13], существует риск, что потребление цинка может начать отставать от темпов его производства. В таких условиях производители качественного концентрата будут обладать явным конкурентным преимуществом. Необходимость повышения качества обусловлена негативными изменениями в процессе металлургического передела (при обжиге), что неизбежно отражается на себестоимости переработки [14] цинковых концентратов, содержащих соединения кремния [15], алюминия, магния и кальция. Это, в свою очередь, приводит к увеличению затрат на переработку и преждевременному износу оборудования. К примеру, при продаже 1 000 ВМТ цинкового концентрата марки КЦ-2 производитель может понести убытки в сумме до 7 тыс. долл. США при изменении содержания  $\text{SiO}_2$  в нем в границах 2,0-3,0%. Таким образом, оптимизация флотации для снижения содержания диоксида кремния становится не просто желательной, а необходимой мерой для повышения общей эффективности производственных процессов и снижения затрат.

Учитывая, что более 80% запасов цинка сосредоточено в сульфидных рудах, данное направление исследований и разработки технологий флотации имеет высокую практическую значимость. Это не только повысит конкурентоспособность производителей, но и будет способствовать устойчивому развитию металлургической отрасли в целом.

Целью исследования являлось повышение качества цинковых концентратов путем установления оптимальных параметров процесса цинковой флотации, обеспечивающих снижение механического выноса нерудных минералов в пенный слой.

### Объект исследования

Объектом исследований являются хвосты медно-свинцового цикла флотации полиметаллической руды Корбалихинского месторождения. Данная руда характеризуется сложным, тонким взаимным срастанием зерен минералов между собой, неравномерным характером вкрапленности и различной крупностью полезных минералов [16]. Постановку тестов осуществляли на пробах хвостов медно-свинцового цикла флотации, являющихся в соответствии с проектом питанием цинк-пиритной флотации.

Данные по содержанию основных элементов, оцениваемых в процессе флотации, а также минералогический состав приведены в **табл. 1**. Содержание класса крупности менее 71 мкм в питании флотационных тестов составляло не менее 98%.

Таблица 1. Вещественный состав питания флотационных опытов

Table 1. The material composition of the feed of flotation tests

Элемент /минерал //соединение	Символ	Содержание, %
Медь	Cu	0,35
Цинк	Zn	6,55
Свинец	Pb	0,86
Железо	Fe	12,77
Сера	S	15,34
//Диоксид кремния	$\text{SiO}_2$	41,8
/Халькопирит	Cp	0,9
/Сфалерит	Sf	10,3
/Галенит	Ga	0,9
/Пирит	Pu	21,4
/Кварц	Qz	30,8
/Клинохлор	Clc	21,5
/Мусковит	Mu	11,5
/Барит	Ba	0,1
/Кальцит	Ca	2,1
Прочие	-	0,5

Распределение минералов и их сростков в питании флотации приведено в **табл. 2**, из которой видно, что сфалерит свободен на 65,6%. Большинство (25,5 абс. %) его сростков приходится на сростки с халькопиритом, с нерудными минералами – 0,5-1,0 абс. % Нерудные минералы на 75,3% свободны и на 23,7% находятся в виде многокомпонентных сростков. Кроме того, основная часть (~80 отн. %) свободных зерен нерудных минералов представлена классом крупности менее 10 мкм. Приведенные данные свидетельствуют о возможности загрязнения цинкового концентрата в большей степени за счет механического выноса минералов вмещающих пород, а также в результате извлечения многокомпонентных сростков за счет гидрофобизации собирателем сульфидов, входящих в их состав, и закреплении сростков на пузырьке воздуха.

Таблица 2. Распределение минералов и их сростков в питании флотации

Table 2. Distribution of minerals and their aggregates in flotation feed

Минерал	Содержание, абс. %						
	свободных зерен	сростков					
		с Sf	с Cp	с Ga	с Pu	с Nr	многокомпонентных
Пирит	92,25	2,50	1,80	0,60	-	2,35	0,50
Сфалерит	65,60	-	25,40	5,20	0,50	0,50	2,80
Галенит	0,50	91,15	1,58	-	1,42	1,50	3,85
Халькопирит	4,95	85,29	-	1,20	1,52	1,24	5,80
Нерудные	75,30	1,00	-	-	-	-	23,7

## Методика проведения исследований

Исследования выполнены в два этапа:

1) оценка влияния режимных параметров флотации на показатели цинкового концентрата и определение их рабочих диапазонов;

2) постановка ПФЭ для определения оптимальных режимных параметров цинковой флотации по критерию механического выноса кремнийсодержащих минералов.

Критерием оценки содержания и распределения нерудных минералов по продуктам обогащения принята массовая доля диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ).

Флотационные тесты на I и II этапах выполнены на пневмомеханической машине «Вектис», аппаратные возможности которой обеспечивают регулировку выбранных факторов. Объем камеры флотомашин – 1 л. Время флотации на I этапе соответствовало производственному масштабу (с учетом коэффициентов перехода, равным 2). Расход воздуха регулировали в диапазоне от 1 до 4 л/мин; плотность пульпы от 10 до 40% тв.; скорость вращения импеллера от 25 до 45 с<sup>-1</sup>. На II этапе сьем пены осуществляли через 1, 3, 6, 9 и 12 мин.

При проведении тестов бесколлекторной флотации использовался МИБК (80 г/т). Тесты по полному реагентному режиму соответствовали режимной карте предприятия в данной операции:  $\text{CaO}$  до содержания остаточной концентрации в диапазоне 450-550 г/дм<sup>3</sup>,  $\text{CuSO}_4$  и бутиловый ксантогенат калия (БКК) – 120 и 50 г/т соответственно.

Коэффициенты разделения цинка и диоксида кремния вычисляли по уравнению Козна:

$$I = \frac{\varepsilon_{\text{Zn}}}{\varepsilon_{\text{SiO}_2}}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{\text{Zn}}$  – извлечение цинка в концентрат;  $\varepsilon_{\text{SiO}_2}$  – извлечение диоксида кремния в концентрат.

Методика проведения экспериментов для оценки механического выноса, соответствовала методологии, предложенной в 1981 году В.Дж. Трахаром, по которой извлечение твердых частиц и воды измеряется во время двух параллельных флотационных тестов со сьемом пенных продуктов в кинетическом режиме: один – в присутствии собирателя, а другой – в его отсутствии [17]. Предполагается, что при одинаковом извлечении воды в концентрат (обычно получаемом после различных временных промежутков флотации в таких условиях, поскольку скорость извлечения минералов различна), количество минералов, извлекаемое за счет механического выноса, одинаково.

Расчет коэффициента механического выноса кремнийсодержащих минералов вмещающих пород ( $ENT_i$ ) в процессе флотации выполняли по формуле [18, 19]

$$ENT_i = \frac{\varepsilon_{ent} \cdot (1 - \varepsilon_{water})}{(1 - \varepsilon_{overall}) \cdot \varepsilon_{water}}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{ent}$  – извлечение компонента в пенный продукт при бесколлекторной флотации, доли ед.;  $\varepsilon_{water}$  – извлечение воды в пенный продукт, доли ед.;  $\varepsilon_{overall}$  – извлечение компонента в пенный продукт при проведении эксперимента по полному реагентному режиму, доли ед.

Поскольку извлечение частиц меньше, чем воды, коэффициент механического выноса безразмерен и меньше единицы.

Инструментом исследования и оптимизации процесса механического выноса выбран метод полного факторного эксперимента (ПФЭ), обеспечивающий системный подход к изучению всех возможных комбинаций изменения уровней принятых факторов [18]. ПФЭ позволяет выявить не только влияние отдельных факторов, но и их взаимодействие. Такой подход помогает выявить синергетические эффекты и оптимизировать работу системы в целом. Важным достоинством принятого инструмента также является то, что с помощью ПФЭ можно определить, какие факторы оказывают наибольшее влияние на процесс и сосредоточить усилия на оптимизации именно этих факторов [21].

Для построения матрицы экспериментов натуральные значения уровней факторов преобразовали в кодовые безразмерные величины по формуле

$$X_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i}, \quad (3)$$

где  $X_i$  – кодовое значение  $i$ -го фактора;  $x_i$  – натуральное текущее значение  $i$ -го фактора;  $\Delta x_i$  – интервал варьирования.

## Результаты и их обсуждение

**Оценка влияния изменения режимных параметров флотации на качественно-количественные характеристики цинкового концентрата.** На рис. 1 приведены результаты тестов по определению влияния плотности пульпы, которая характеризует массу частиц в единице объема флотационной пульпы, на качественно-количественные показатели концентрата. Увеличение концентрации твердого вещества с 10 до 40% тв. повышает вязкость суспензии, снижая тем самым свободу движения частиц и аэрированность пульпы.

Ожидаемо, что при повышенной плотности вероятность механического захвата нерудных минералов минерализованными пузырьками и увлечение выноса их в пену увеличивается. В проведенной серии опытов извлечение диоксида кремния увеличивается с 5,58 до 6,61%, содержание диоксида кремния в концентрате возрастает на 4,73 абс. %, коэффициент разделения снижается с 16,84 до 13,92 (см. рис. 1). В ходе проведения экспериментов отмечено, что из-за стесненных условий движения снижается вероят-

ность столкновения частиц с пузырьками и, как было отмечено другими исследователями [22], это приводит к снижению выхода концентрата.

Как видно на **рис. 2**, недостаточный расход воздуха (1 л/мин) снижает вероятность столкновения флотируемых частиц с пузырьками воздуха, и частицы ценных компонентов не извлекаются в пенный продукт, приводя к сверхнормативным потерям цинка с хвостами флотации. Потери составили 13,89%.

Увеличение расхода воздуха позволяет повысить извлечение цинка в концентрат, однако при этом возрастает и извлечение минералов вмещающих пород. При максимальном расходе воздуха 4 л/мин селективность флотации снижается, на что указывает уменьшение коэффициента разделения до 10,04 против 27,2 при подаче 1 л/мин воздуха. Качество концентрата по цинку в опыте при расходе воздуха 4 л/мин составило 36,92% против 40,23% в опыте при расходе воздуха, равном 1 л/мин.

Высота пенного слоя и селективность разделения минералов и, соответственно, эффективность флотации также зависят от скорости импеллера, поскольку она оказывает определяющее влияние на количество пу-

зырьков и их дисперсность. Чем больше число пузырьков и их размеры, тем лучше аэрированность пульпы и больше скорость флотации. Результаты тестов проиллюстрированы на **рис. 3**, из которого видно, недостаточная скорость вращения ( $25 \text{ с}^{-1}$ ) не позволила создать необходимое количество пузырьков, что отразилось на низком уровне извлечения цинка в концентрат (86,86%), при этом качество концентрата и коэффициент разделения в данной серии опытов получены максимальные – 41,8 и 46,78 соответственно.

Изменение гидродинамических параметров при повышении скорости вращения импеллера до  $45 \text{ с}^{-1}$  из-за повышенной турбулентности приводит к снижению эффективности сцепления между частицами и пузырьками и происходит неселективный вынос пульпового материала в пенный продукт. Из-за увеличения скорости импеллера скорость флотации возросла и выход концентрата увеличен более чем в 4 раза. Из данных, проиллюстрированных на **рис. 2**, видно, что извлечение цинка составляет 98,66%, при этом качество концентрата (по цинку) не превышает 11,33%, а коэффициент разделения составляет 1,71.

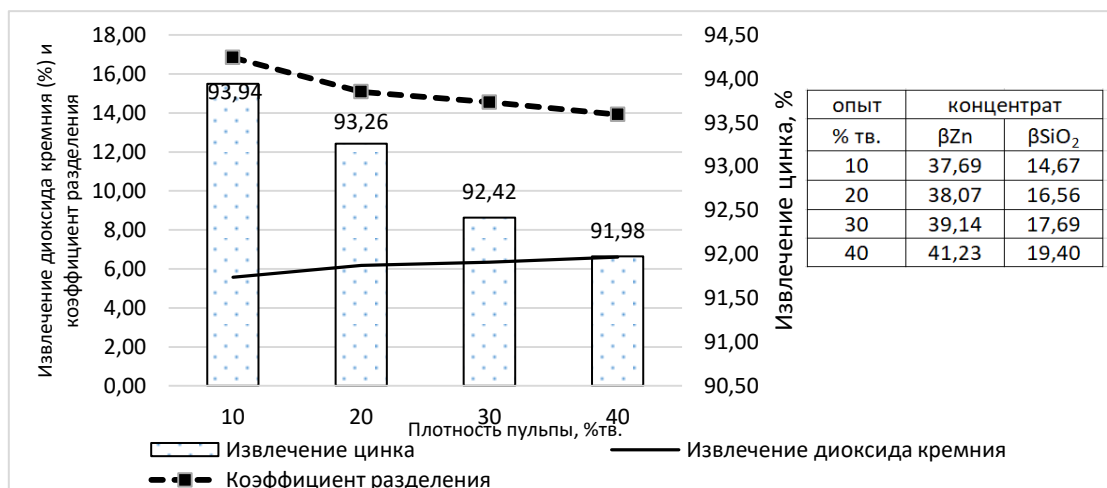


Рис. 1. Результаты серии тестов по определению влияния плотности пульпы на показатели флотации  
Fig. 1. The results of a series of tests to determine the effect of pulp density on flotation performance

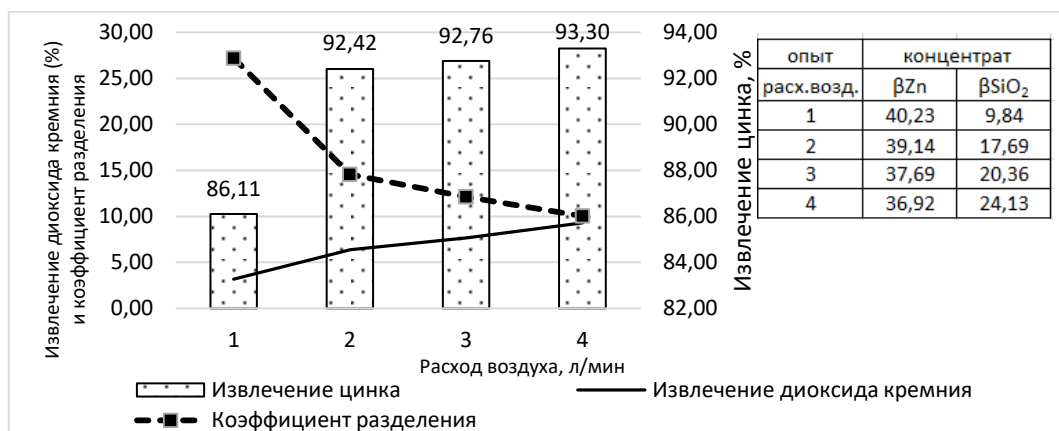


Рис. 2. Результаты серии тестов по определению влияния расхода воздуха на показатели флотации  
Fig. 2. The results of a series of tests to determine the effect of air flow on flotation performance

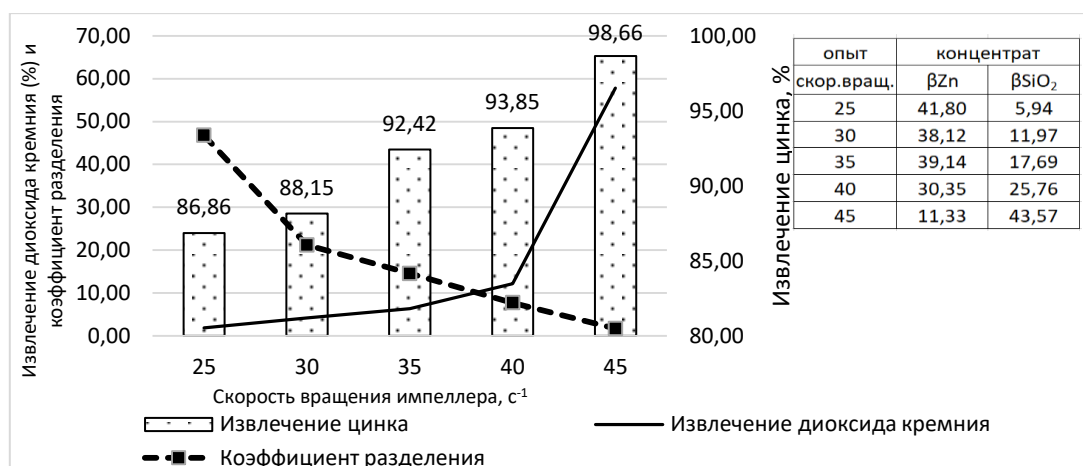


Рис. 3. Результаты серии тестов по определению влияния скорости вращения импеллера на показатели флотации  
Fig. 3. The results of a series of tests to determine the effect of impeller rotation speed on flotation performance

Управляя режимными параметрами технологического процесса, во флотомашине необходимо создать аэрогидродинамические условия, способные обеспечить одновременно эффективное закрепление целевых минералов на поверхности пузырьков воздуха и обеспечить высокий уровень селективности процесса, исключая механический вынос частиц минералов вмещающих пород в пенный слой. Экспериментальным путем определен диапазон значений скорости вращения импеллера, обеспечивающий необходимую и достаточную турбулентность, чтобы обеспечить образование агрегатов пузырек-частица и не нарушать их.

Таким образом, применительно к технологическому процессу получения цинка из полиметаллической руды определен рациональный диапазон регулирования режимных параметров, способный обеспечить необходимый уровень извлечения цинка при максимальном коэффициенте разделения сульфидов и минералов вмещающих пород: плотность пульпы – от 25 до 35% тв.; расход воздуха – от 1 до 3 л/мин; скорость вращения импеллера – от 30 до 40 с<sup>-1</sup>.

**Выявление влияния параметров флотации на коэффициент механического выноса.** Функциональная зависимость коэффициента механического выноса минералов вмещающих пород при флотации имеет вид

$$Y = f(X_1, X_2, X_3) \text{ или } ENT = f(\Pi, P, C). \quad (4)$$

Фактические значения независимых вариационных факторов приняты по результатам опытов, выполненных на I этапе:

- плотность ( $\Pi$ ) пульпы во флотационной камере –  $X_1$  (интервал варьирования 25-35% тв., в условных единицах -1 - +1);
- расход ( $P$ ) подаваемого воздуха –  $X_2$  (интервал варьирования 1-3 л/мин, в условных единицах -1 - +1);
- скорость ( $C$ ) вращения импеллера –  $X_3$  (интервал варьирования 30-40 с<sup>-1</sup>, в условных единицах -1 - +1).

Подставив в уравнение регрессии выражения для кодирования факторов и выполнив арифметические

преобразования, получено уравнение регрессии в натуральных значениях факторов:

$$\begin{aligned} ENT_p = & -2,0403 + 0,063 \cdot \Pi + 0,1029 \cdot P + \\ & + 0,0759 \cdot C - 0,00004 \cdot \Pi \cdot P - 0,0021 \cdot \Pi \cdot C + \\ & + 0,00022 \cdot \Pi \cdot P \cdot C - 0,0066 \cdot P \cdot C. \end{aligned} \quad (5)$$

Как видно из уравнения (5), индексы совокупного влияния в 10 и более раз меньше индивидуальных факторов, что говорит о их незначительном вкладе в значение коэффициента механического выноса. Индексы каждого фактора в отдельности положительные, что указывает на прямо пропорциональную связь между переменными.

В результате комплекса исследований экспериментально доказано, что увеличение любого из выбранных управляемых факторов приводит к росту коэффициента механического выноса нерудных минералов в пенный продукт. При этом самым значимым фактором является расход воздуха. Степень влияния плотности пульпы и скорости вращения приблизительно одинаковы.

Воспроизводимость опытов была проверена по критерию Кохрена, значение которого составило 0,22, что ниже табличного значения – 0,51. Таким образом, условие  $G_p \leq G_t$  выполнено, следовательно, опыты признаны воспроизводимыми.

Для оценки значимости коэффициентов регрессии находили погрешность воспроизводимости коэффициентов и доверительный интервал для абсолютных значений коэффициентов. На основании чего определено, что все коэффициенты регрессии, кроме одного – учитывающего взаимосвязь расхода воздуха и скорости вращения импеллера, значимы.

Результатами расчета дисперсии адекватности определено, что ее значение меньше дисперсии воспроизводимости, следовательно, не применяя критерий Фишера, можно утверждать, что найденное уравнение регрессии адекватно. Таким образом, построенная модель адекватна фактической тенденции и



найденная зависимость достоверно описывает влияние факторов на механический вынос компонентов нерудных минералов в процессе флотации полиметаллической руды.

Экспериментальные ( $ENT_{\text{э}}$ ) и расчетные ( $ENT_{\text{р}}$ ) данные представлены в табл. 3. Как видно, погрешность каждого расчетного коэффициента механического выноса не превышает 5%, что подтверждает возможность применения найденной математической модели для определения потенциала минимизации загрязнения цинкового концентрата минералами вмещающих пород в исследуемом диапазоне изменения выбранных параметров управления технологического процесса.

Таблица 3. Результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных по определению механического выноса нерудных минералов в концентрат

Table 3. Results of comparison of experimental and calculated data on determination of mechanical entrainment of nonmetallic minerals into concentrate

Номер опыта	Доли единиц					Погрешность, %
	$ENT_{\text{э}1}$	$ENT_{\text{э}2}$	$ENT_{\text{э}3}$	$\overline{ENT}$	$ENT_{\text{р}}$	
1	0,7662	0,7848	0,7834	0,7781	0,7488	3,92
2	0,6108	0,6326	0,6049	0,6161	0,6344	2,88
3	0,4006	0,4029	0,3868	0,3967	0,4066	2,48
4	0,6158	0,6016	0,6067	0,6080	0,6103	0,37
5	0,6443	0,6185	0,6128	0,6252	0,6442	3,04
6	0,5140	0,5369	0,5053	0,5188	0,5304	2,25
7	0,4646	0,4455	0,4299	0,4467	0,4691	4,78
8	0,2790	0,2644	0,2761	0,2732	0,2850	4,15

Промышленная апробация

Полученная математическая модель была апробирована на действующей Рубцовской обогатительной фабрике в IV квартале 2024 г. путем реализации комплекса мероприятий, направленных на регулирование режимных параметров технологического процесса флотации (с учетом коэффициентов масштабирования от лабораторных к промышленным условиям). На рис. 4 приведена проектная схема цепи аппаратов цинк-пиритного цикла фабрики, где стрелками схематично показаны мероприятия, внедренные на данном этапе:

1. Система разбавления пульпы, поступающей в операции перечистного цикла флотации, для снижения содержания твердого более чем в 2 раза.
2. Снижение на 10 отн. % скорости вращения импеллера флотомшины перечистного цикла.
3. Оптимизация расхода воздуха, подаваемого во флотоблоки основных операций. Подача воздуха по операциям снижена от 15 до 25 отн. %.

Результаты промышленной эксплуатации обогатительной фабрики в условиях реализации предварительного этапа работ по внедрению оптимальных режимных параметров операций цинк-пиритного цикла флотации полиметаллической руды указывают на возможность снижения механического выноса кремнийсодержащих минералов вмещающих пород в пенные продукты. По данным товарных балансов до и после реализации – III и VI квартал 2024 года соответственно, зафиксирован рост качества товарного цинкового концентрата за счет снижения на 15,66 отн. % (с 2,81 до 2,37%) массовой доли  $\text{SiO}_2$  в нем. Качественно-количественные показатели товарного цинкового концентрата по основному металлу при этом остались на уровне базового значения (52,1-52,9%).

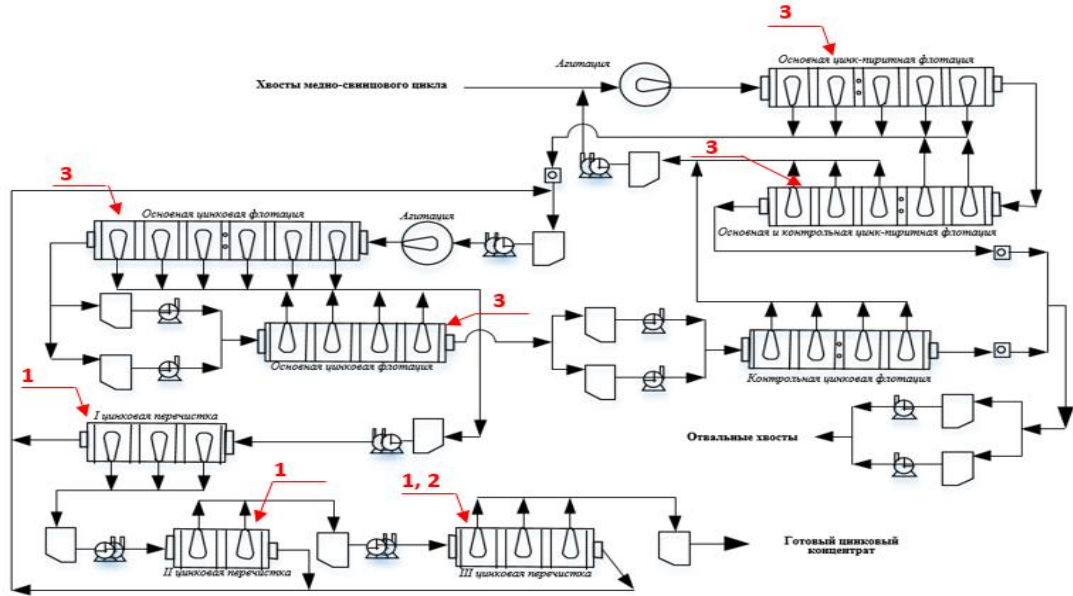


Рис. 4. Схема цепи аппаратов цинк-пиритного цикла переработки полиметаллической руды

Fig. 4. Circuit diagram of zinc-pyrite cycle devices for polymetallic ore processing



Учитывая, что в настоящее время на предприятии выпускается концентрат, соответствующий марке КЦ-2 с регламентируемым содержанием  $\text{SiO}_2$  до 3%, положительный опыт реализованных мероприятий по оптимизации режимных параметров технологического процесса тиражируется на все операции схемы получения цинкового концентрата, что в итоге прогнозно позволит повысить марку выпускаемого продукта до КЦ-1 с содержанием  $\text{SiO}_2$  до 2%.

### Заключение

В ходе экспериментальных исследований определено влияние турбулентности в процессе флотации, вызываемой изменением плотности пульпы, расхода воздуха и скорости вращения импеллера, на ее эффективность. Экспериментальным путем установлен рабочий диапазон оптимальных режимных параметров, обеспечивающих надежное закрепление целевых минералов на поверхности воздушных пузырьков и повышение селективности процесса.

Результатами лабораторных исследований, выполненных по известной методике, определены коэффициенты механического выноса, значения которых колеблются от 0,2732 до 0,7781 в зависимости от изменения режимных параметров технологического процесса в исследуемом диапазоне их значений.

Основываясь на надёжности результатов математической обработки данных, были приняты обоснованные решения по оптимизации режимных параметров процесса и разработаны рекомендации для их внедрения на существующем производстве, что позволило снизить механический вынос кремнийсодержащих минералов вмещающих пород, тем самым повысив качество товарного цинкового концентрата. Массовая доля диоксида кремния снижена на 15,66 отн. %.

### Список источников

1. Чантурия В.А. Инновационные процессы в технологиях переработки труднообогатимого минерального сырья // Геология рудных месторождений. 2008. Т.50. №6. С. 558-568.
2. Обоснование интегративного критерия для прогноза возможности селективной дезинтеграции техногенного сложноструктурного сырья / Горлова О.Е., Орехова Н.Н., Колодежная Е.В., Колкова М.С., Глаголева И.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. № 3. С. 15-26
3. Игнаткина В.А., Бочаров В.А., Тубденева Б.Т. К поиску режимов селективной флотации сульфидных руд на основе сочетания собирателей различных классов соединений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2010. Т. 46. №1. С. 97-103.
4. Применение отечественных полимерных анионоактивных депрессоров при флотации забалансовой оталькованной медно-никелевой руды / Лавриненко А.А., Кузнецова И.Н., Лусиян О.Г., Гольберг Г.Ю. // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2023. Т.29. №5. С. 5-14.
5. Аспектный анализ механизмов загрязнения сульфидных концентратов шламами из вмещающих пород и обзор методов его снижения / Арабаджи Я.Н., Орехова Н.Н., Абдрахманов К.И., Абдрахманов Э.И. // Вестник Забайкальского государственного университета. 2024. Т.30. №4. С. 55-70.
6. Wang C., Sun C., Liu Q. Entrainment of Gangue Minerals in Froth Flotation: Mechanisms, Models, Controlling Factors, and Abatement Techniques—a Review // Mining, Metallurgy & Exploration. 2021, vol. 38, pp. 673–692.
7. Механический вынос и истинная флотация природной полиметаллической руды / Абиди А., Эламари К., Бакауи А., Якуби А. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. №6. С. 181-189.
8. Hans-Jürgen Butt, Karlheinz Graf, Michael Kappl. Physics and Chemistry of Interfaces. 2013, pp. 355.
9. Bhondayi C., Moys M.N. Effects of gas distribution profile on flotation cell performance: An experimental investigation // International journal of mineral processing. 2015, no. 135, pp. 20-31.
10. The effect of high intensity conditioning on the flotation of a nickel ore, Part 1: size by size analysis / Chen G., Gran S., Sobieraj S., Ralston J. // Minerals Engineering. 1999, pp. 1185-1200.
11. Understanding the entrainment behavior of gangue minerals in flake graphite flotation / Qiu Ya., Mao Z., Sun K., Zhang L., Qian Yu., Lei T., Liang W., An Ya. // Minerals. 2022, pp. 1-15.
12. Xu Q.D., Hu W., Zhang M. High-turbulence fine particle flotation cell optimization and verification // Scientific Reports. 2024, pp. 1-32.
13. Стратегия развития металлургической промышленности Российской Федерации на период до 2030 года // <https://sudact.ru/law/rasporiazhenie-pravitelstva-rf-ot-28122022-n-4260-r/?ysclid=mbpepvf4xc607086226> (дата обращения 22.05.2025).
14. Tan P. Challenges to treat complex zinc concentrate and latest technical development // Journal of physics: Conference series. The 10th International Conference on Lead and Zinc Processing (Lead-Zinc 2023). 2024, pp. 1-14.
15. Терентьев В.М. Исследование и разработка технологии обжига в печах кипящего слоя тонкодисперсных сульфидных цинковых концентратов: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 2017.
16. Храмов А.Н., Купцова А.В. Особенности раскрываемости минералов полиметаллической руды Корбалихинского месторождения // XIV Международная научно-практическая конференция. В 3 ч. Чита: Забайкальский государственный университет, 2014. Ч. 1. С. 122-128.
17. Ross V. Flotation and entrainment of particles during batch flotation tests // Minerals Engineering. 1990, pp. 245-256.
18. Выбор параметров флотации сульфидных медно-никелевых руд на основе анализа распределения компонентов по флотирруемости / Александрова Т.Н., Афанасова А.В., Кузнецов В.В., Абурова В.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. №1. С. 131-147.
19. Кузнецов В.В. Развитие методов определения показателей флотирруемости минералов для разработки эффективных технологических решений при переработке золотосодержащих руд: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2023.

20. Козин В.З., Пелевин А.Е. Теория инженерного эксперимента [Электронное издание]. Екатеринбург: УГГУ, 2016.
  21. Козин В.З. Экспериментальное моделирование и оптимизация процессов обогащения полезных ископаемых. М.: Недра, 1984.
  22. Анализ и учет факторов, влияющих на технологический процесс флотации калийных руд / Олиферович Д.С., Шилин Л.Ю., Батюков С.В., Пригара В.Н. // Доклады БГУИР. 2009. С. 59-66.
- References**
1. Chanturiya V.A. Innovation processes in technologies for the processing of refractory mineral raw materials. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy* [Geology of Ore Deposits], 2008;50(6):491-501. (In Russ.)
  2. Gorlova O.E., Orekhova N.N., Kolodezhnaya E.V., Kolkova M.S., Glagoleva I.V. Providing a rationale for an integrative criterion to predict the potential selective disintegration of technology-related, complex structured raw materials. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2023;21(3):15-26. (In Russ.)
  3. Ignatkina V.A., Bocharov V.A., Tubdenova B.T. Selective flotation modes for sulfide ore based on combination of different rank collectors. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Journal of Mining Science], 2010;46(1):97-103. (In Russ.)
  4. Lavrinenko A.A., Kuznetsova I.N., Lusinyan O.G., Golberg G.Yu.. Utilizing Russian polymer anion active depressants in the flotation of out-of-balance talcose copper nickel ore. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya* [News of higher educational institutions. Non-ferrous metallurgy], 2023;29(5):5-14. (In Russ.)
  5. Arabadzhi Ya.N., Orekhova N.N., Abdrakhmanov K.I., Abdrakhmanov E.I. Aspect analysis mechanisms contamination of sulfide concentrates by slime from host rock minerals and a review of its reduction methods. *Vestnik Zabaykalskogo gosudarstvennogo universiteta* [Transbaikalian State University Journal], 2024;30(4):55-70. (In Russ.)
  6. Wang C., Sun C. Liu Q. Entrainment of Gangue Minerals in Froth Flotation: Mechanisms, Models, Controlling Factors, and Abatement Techniques—a Review. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2021;38:673-692.
  7. Abidi A., Elamari K., Bacaoui A., Yacoubi A. Entrainment and true flotation of a natural complex ore sulfide. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Physical and technical problems of mineral resources development], 2014;(6):181-189. (In Russ.)
  8. Hans-Jürgen Butt, Karlheinz Graf, Michael Kappl. *Physics and Chemistry of Interfaces*. 2013:355.
  9. Bhondayi C., Moys M.N. Effects of gas distribution profile on flotation cell performance: An experimental investigation. *International journal of mineral processing*. 2015;135:20-31.
  10. Chen G., Gran S., Sobieraj S., Ralston J. The effect of high intensity conditioning on the flotation of a nickel ore, Part 1: size by size analysis. *Minerals Engineering*. 1999;1185-1200.
  11. Qiu Ya., Mao Z., Sun K., Zhang L., Qian Yu., Lei T., Liang W., An Ya. Understanding the entrainment behavior of gangue minerals in flake graphite flotation. *Minerals*. 2022;1-15.
  12. Xu Q.D., Hu W., Zhang M. High-turbulence fine particle flotation cell optimization and verification // *Scientific Reports*. 2024:1-32.
  13. Strategy for the development of the metallurgical industry of the Russian Federation for the period up to 2030 // <https://sudact.ru/law/rasporiazhenie-pravitelstva-rf-ot-28122022-n-4260-r/?ysclid=mbpepvf4xc607086226> (accessed 22.05.2025). (In Russ.)
  14. Tan P. Challenges to treat complex zinc concentrate and latest technical development. *Journal of physics: Conference series. The 10th International Conference on Lead and Zinc Processing (Lead-Zinc 2023)*. 2024:1-14.
  15. Terentyev V.M. *Issledovanie i razrabotka tekhnologii obzhiga v pechah kipyashchego sloya tonkodispersnykh sulfidnykh tsinkovykh kontsentratsiy* [Research and development of technology for roasting finely dispersed sulfide zinc concentrates in fluidized bed furnaces. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences]. Chelyabinsk, 2017.
  16. Khamrov A.N., Kuptsova A.V. Features of the mineral recovery of polymetallic ore of the Korbalkhinskoye deposit. *XIV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya: v 3-chastyah. Tom Chast 1* [XIV International scientific and practical conference: in 3 parts. Volume Part 1]. Chita: Transbaikalian State University, 2014, pp. 122-128. (In Russ.)
  17. Ross V. Flotation and entrainment of particles during batch flotation tests. *Minerals Engineering*. 1990:245-256.
  18. Aleksandrova T.N., Afanasova A.V., Kuznetsov V.V., Aburova V.A. Selection of copper–nickel sulfide ore flotation parameters based on floatability ranking of flotation components. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [MIAB], 2022;(1):131-147. (In Russ.)
  19. Kuznetsov V.V. *Razvitiye metodov opredeleniya pokazateley flotiruemosti mineralov dlya razrabotki effektivnykh tekhnologicheskikh resheniy pri pererabotke zolotosoderzhashchih rud*. Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidatata tekhnicheskikh nauk [Development of methods for determining mineral flotation indicators for the development of effective technological solutions in the processing of gold-bearing ores. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences]. St. Petersburg, 2023.
  20. Kozin V.Z., Pelevin A.E. *Teoriya inzhenernogo eksperimenta* [Theory of engineering experiment]. Yekaterinburg: Electronic publication of UGMU, 2016. (In Russ.)
  21. Kozin V.Z. *Eksperimentalnoe modelirovaniye i optimizatsiya processov obogashcheniya poleznykh iskopayemykh* [Experimental modeling and optimization of mineral enrichment processes]. Moscow: Nedra, 1984. (In Russ.)
  22. Olfierovich D.S., Shilin L.Yu., Batyukov S.V., Prigara V.N. Analysis and accounting of factors influencing the technological process of flotation of potassium ores. *Doklady BGUIR* [Reports of BSUIR], 2009:59-66. (In Russ.)

Поступила 03.04.2025; принята к публикации 10.06.2025; опубликована 30.06.2025  
Submitted 03/04/2025; revised 10/06/2025; published 30/06/2025

**Арабаджи Яна Николаевна** – главный специалист управления обогатительного производства, ОАО «Уральская горно-металлургическая компания», Верхняя Пышма, Россия.  
Email: yana\_arabadzhi@mail.ru

**Орехова Наталья Николаевна** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: n\_orehova@mail.ru. ORCID 0000-0002-3507-5198

**Тюленев Андрей Юрьевич** – главный обогатитель, АО «Сибирь-полиметаллы», Рубцовск, Россия.  
Email: TAY@sib-pm.ru

**Баранова Любовь Петровна** – главный специалист управления обогатительного производства, ОАО «Уральская горно-металлургическая компания», Верхняя Пышма, Россия.  
Email: l.baranova@uralmine.com

**Yana N. Arabadzhi** – Chief Specialist of the Processing Production Department, JSC Ural Mining and Metallurgical Company, Verkhnyaya Pyshma, Russia.  
Email: yana\_arabadzhi@mail.ru

**Natalia N. Orekhova** – DrSc (Eng.), Associate Professor, Department of Geology, Surveying and Mineral Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: n\_orehova@mail.ru. ORCID 0000-0002-3507-5198

**Andrey Yu. Tyulenev** – The main concentrator, SIBIR-POLYMETALS joint-stock company, Rubtsovsk, Russia.  
Email: TAY@sib-pm.ru

**Lyubov P. Baranova** – Chief Specialist of the Processing Production Department, JSC Ural Mining and Metallurgical Company, Verkhnyaya Pyshma, Russia.  
Email: l.baranova@uralmine.com

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.271

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-28-34



## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ГРОХОТИЛЬНО-ДРОБИЛЬНЫХ ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ ПУНКТОВ

Чебан А.Ю.

Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия

**Аннотация. Актуальность исследования.** При ведении открытых горных работ образуется большое количество техногенных отходов, направляемых в породные отвалы, а также штабели некондиционной руды, в которых может содержаться существенная доля металла, извлекаемого из недр. На ряде месторождений цветных и благородных металлов после взрывного рыхления мелкокусковая рудная масса значительно обогащена полезным компонентом, при этом мелкая фракция некондиционных руд также имеет повышенное содержание металла, достаточное для рентабельной переработки с применением кучного выщелачивания. **Цель работы.** Обоснование ресурсосберегающей малоотходной технологии освоения месторождений ценного минерального сырья с выделением продуктивной мелкой фракции из некондиционных руд в процессе их транспортировки комбинированным автомобильно-конвейерным транспортом за счет расширения функциональных возможностей грохотильно-дробильного перегрузочного пункта карьера. **Результаты.** В статье предлагается схема комбинированного транспорта с использованием усовершенствованного грохотильно-дробильного перегрузочного пункта, обеспечивающего выделение продуктивной мелкой фракции в процессе перегрузки рудной массы из автомобильного транспорта в конвейерный, которая собирается в аккумулялирующей емкости, а затем перегружается в специальное транспортное средство для перемещения к месту переработки. Рассмотрена возможность использования предлагаемого в статье решения применительно к одному из золоторудных месторождений. **Выводы.** Проведенные исследования показали, что выделение на перегрузочном пункте обогащенной мелкой фракции из некондиционных руд позволит дополнительно направить на кучное выщелачивание рудную массу, содержащую более 8% добываемого из недр металла, и в 1,74 раза снизить потери золота со складываемыми некондиционными рудами. Кроме того, удаление из некондиционных руд мелкой фракции обеспечит уменьшение пыления штабелей и сокращение образования токсичных компонентов при воздействии на штабели атмосферных осадков.

**Ключевые слова:** рудные месторождения, некондиционные руды, потери металла, обогащенная мелкая фракция, комбинированный карьерный транспорт, грохочение, кучное выщелачивание

© Чебан А.Ю., 2025

### Для цитирования

Чебан А.Ю. Повышение эффективности открытых горных работ за счет совершенствования грохотильно-дробильных перегрузочных пунктов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 28-34. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-28-34>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



# INCREASING THE EFFICIENCY OF OPEN MINING THROUGH IMPROVING SCREENING AND CRUSHING TRANSFER POINTS

Cheban A.Yu.

Mining Institute, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** When conducting open-pit mining, a large amount of technogenic waste is generated, which is sent to rock dumps, as well as stacks of substandard ore, which may contain a significant proportion of metal extracted from the subsoil. In a number of deposits of non-ferrous and precious metals, after explosive loosening, the fine-sized ore mass is significantly enriched with a useful component, while the fine fraction of substandard ores also has an increased metal content, sufficient for cost-effective processing using heap leaching. **Objective** is justification of a resource-saving, low-waste technology for the development of deposits of valuable mineral raw materials with the separation of a productive fine fraction from substandard ores during their transportation by combined automobile-conveyor transport by expanding the functionality of the screening and crushing transfer point of the quarry. **Results.** The article proposes a scheme of combined transport using an improved screening-crushing transfer point, which ensures the release of a productive fine fraction in the process of reloading the ore mass from road transport to a conveyor, which is collected in an accumulating tank, and then reloaded into a special vehicle for movement to the processing site. The possibility of using the solution proposed in the article in relation to one of the gold deposits is considered. **Conclusions.** Studies have shown that the separation of an enriched fine fraction from substandard ores at the transfer point will make it possible to additionally send ore mass containing more than 8% of the metal extracted from the subsoil to heap leaching, and to reduce losses of gold from stored substandard ores by 1,74 times. In addition, the removal of fine fractions from substandard ores will reduce the dusting of stacks and reduce the formation of toxic components when stacks are exposed to atmospheric precipitation.

**Keywords:** ore deposits, substandard ores, metal losses, enriched fine fraction, combined quarry transport, screening, heap leaching

## For citation

Cheban A.Yu. Increasing the Efficiency of Open Mining Through Improving Screening and Crushing Transfer Points. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 28-34. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-28-34>

## Введение

Во всем мире растет добыча и потребление металлов, при этом в отработку вовлекаются руды со все более низким содержанием полезного компонента [1-4], например, среднее содержание золота в рудах одного из крупнейших разрабатываемых в России месторождений Светлинское составляет 0,97 г/т [5].

Согласно данным работы [1] минимальное промышленное содержание в руде меди, никеля, свинца и цинка с 1987 по 2014 годы сократилось соответственно в 1,75, 2,33, 1,83 и 2,00 раза. В исследовании [3] указывается, что в РФ за период с 1991 по 2012 годы среднее содержание золота в доказанных запасах уменьшилось в 1,8 раза. Одновременно происходит рост глубины карьеров, таким образом, перманентное ухудшение горнотехнических и горно-геологических условий отработки месторождений предопределяет ускоренный рост объемов извлекаемых из недр кондиционных и некондиционных руд, минерализованных вмещающих и вскрышных пород. Повысить эффективность горного производства возможно за счет разработки и применения ресурсосберегающих и малоотходных технологий, направленных на повышение извлечения полезного компонента

с вовлечением в переработку части некондиционных руд, а также уменьшение загрязнения окружающей среды [6-11].

## Состояние вопроса и постановка проблемы

Освоение месторождений полезных ископаемых открытым способом имеет ряд преимуществ перед подземной разработкой, в том числе способностью извлекать из недр большие объемы рудной массы за счет применения высокопроизводительного выемочно-погрузочного и транспортного оборудования. Существенным недостатком открытой разработки является образование огромного количества техногенных отходов, складываемых на поверхности в отвалах пустых пород и штабелях некондиционных руд. При разработке рудных месторождений в ряде случаев объем техногенных отходов в 5–10 раз превышает объем кондиционной рудной массы [12, 13], в частности, на карьере Светлинский из 22,2 млн м<sup>3</sup> извлекаемой горной массы техногенные отходы (вскрышные и минерализованные вмещающие породы) составляют 17,8 млн м<sup>3</sup>, а на карьере Курасан из 12,0 млн м<sup>3</sup> – 10,8 млн м<sup>3</sup> [5].

В процессе развития открытых горных работ, углубления карьера и увеличения дальности транспортировки стоимость перемещения вынуженной из недр горной массы автотранспортом непрерывно возрастает [14], в связи с чем на определенном этапе на карьере целесообразно внедрение комбинированного автомобильно-конвейерного транспорта, который позволяет на 30–40% снизить себестоимость транспортировки и в 1,4–2,0 раза увеличить производительность труда [15–17]. С применением автомобильно-конвейерного транспорта перемещаются как вскрышные породы, так и руда, например, на карьере Мурунтау (Узбекистан) в дополнение к породному потоку конвейерная линия используется для транспортирования из карьера и складирования в отдельном ярусе конвейерного отвала забалансовой руды, одновременно на внутрикарьерных промежуточных складах было организовано накапливание руды с последующей «залповой» ее отгрузкой в поточный комплекс, доля комбинированного транспорта в общем грузопотоке карьера составляет по разным годам 50–65%, а в общем грузопотоке вскрыши – 70–85% [18].

Забалансовые (некондиционные) руды, складываемые в специальных штабелях, при больших объемах содержат в себе существенную часть металла месторождений. Внедрение в горное производство технологии кучного выщелачивания позволило направить на переработку часть ранее некондиционного сырья, в частности, на золоторудных месторождениях на кучное выщелачивание направляются бедные и некондиционные руды с содержанием золота 0,5–2,0 г/т [19, 20].

На ряде месторождений цветных и благородных металлов после взрывного или механического рыхления при ведении добычных работ мелкокусковая рудная масса значительно обогащена полезным компонентом, в сравнении с более крупными кусками руды, в связи с чем выделенная рудная мелочь имеет содержание металла в 2–3 раза выше, чем исходная рудная масса [21–24]. В частности, исследование показало, что на золоторудном месторождении Сухой Лог в некондиционной руде классы крупности -5+0 и -10+5 мм имеют содержание металла 2,14 и 1,28 г/т при среднем содержании золота в рудной массе 0,73 г/т [22]. Следовательно, в некондиционной руде находится продуктивная мелкая фракция с содержанием полезного компонента, достаточным для ее рентабельной переработки с применением различных способов.

Известен ряд технологических решений по выделению продуктивной мелкой фракции из некондиционной рудной массы, в частности с применением грохотильных установок или переэкскавации штабелей, что требует дополнительных затрат на перевалку и транспортировку руды [25, 26]. В работе [27] предлагается конструкция ковша карьерного экскаватора, позволяющая вести отделение продуктивной мелкой фракции в процессе погрузки транспортных средств.

Технология [21] при разработке нагорных карьеров предполагает выделение мелкой фракции на рудоскате специальной конструкции. Недостатком оборудования, предлагаемого в работах [21, 27], является относительно невысокая эффективность просеивания рудной мелочи. В исследовании [24] обосновывается технологическая схема по отделению мелкой продуктивной фракции посредством усовершенствованного отвалообразователя при формировании штабеля некондиционного минерального сырья, недостатком схемы является полностью автомобильная доставка горной массы к месту складирования, что может быть экономически нецелесообразно при освоении крупных месторождений.

Целью исследования является разработка ресурсосберегающей малоотходной технологии освоения месторождений ценного минерального сырья с выделением обогащенной рудной мелочи из некондиционных руд в процессе их транспортировки комбинированным автомобильно-конвейерным транспортом за счет расширения функциональных возможностей грохотильно-дробильного перегрузочного пункта карьера.

### Результаты исследования

При организации автомобильно-конвейерного транспорта для перемещения взорванной горной массы в карьере создается дробильно-перегрузочный пункт, который обеспечивает дробление негабаритных включений и крупных кусков до кондиционных размеров (-300–400 мм), необходимых для перемещения груза конвейерной лентой. Необходимо отметить, что направление в дробилку всего объема перемещаемой горной массы, включающей преимущественно куски кондиционной крупности, предопределяет снижение пропускной способности перегрузочных пунктов и перерасход энергии на дробление. Использование предварительного грохочения перед поступлением рудной массы в дробилку существенно повышает производительность перегрузочного пункта, при этом из горной массы выделяются транспортбельные фракции, а на додрабывание поступают только крупные куски [28].

Автором предлагается схема комбинированного транспорта с использованием усовершенствованного грохотильно-дробильного перегрузочного пункта, обеспечивающего выделение продуктивной мелкой фракции в процессе перегрузки рудной массы из автомобильного транспорта в конвейерный. Усовершенствованный грохотильно-дробильный перегрузочный пункт включает колосниковый грохот 1, приемный бункер 2, дробилку 3, накопительный бункер 4, пластинчатый питатель 5, вибрационный грохот 6 с набором просеивающих поверхностей 7–8, емкость 9 для аккумуляции мелкой продуктивной фракции, размещенная на опорной раме 10, прикрепленной к подпорной стенке 11 (рис. 1).

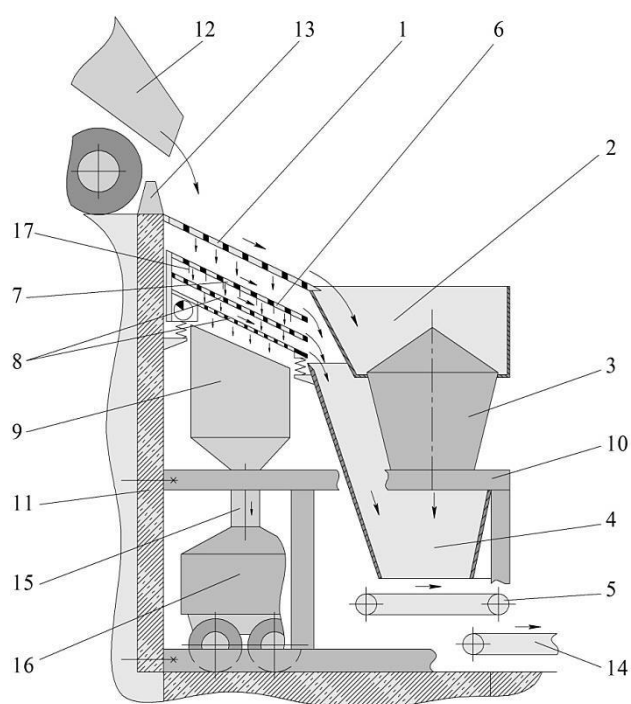


Рис. 1. Схема усовершенствованного грохотильно-дробильного перегрузочного пункта при работе с некондиционной рудной массой  
Fig. 1. Scheme of an improved screening and crushing transfer point when working with substandard ore mass

При осуществлении перегрузки автосамосвал 12 задним ходом подъезжает до контакта задних колес с упором 13 и выгружает некондиционную рудную массу на колосниковый грохот 1. Крупнокусковая рудная масса направляется в приемный бункер 2 и далее в дробилку 3, а оставшаяся рудная масса, состоящая из транспортабельных для ленточного конвейера 14 фракций, подается на вибрационный грохот 6. Наличие нескольких просеивающих поверхностей 7-8 позволяет обеспечить более высокую эффективность грохочения при выделении мелкой фракции, минимизируя потери продуктивной рудной мелочи вместе с потоками надрешетных фракций, ссыпающихся в накопительный бункер 4. Также в накопительный бункер 4 подается продукт, полученный после дробления крупнокусковой горной массы. Пластинчатый питатель 5 подает некондиционную рудную массу на ленточный конвейер 14, который транспортирует ее к месту штабелирования. Продуктивная мелкая фракция в виде подрешетного продукта вибрационного грохота 6 аккумулируется в емкости 9, откуда по лотку 15 разгружается в специальное транспортное средство 16 и направляется к месту переработки – на кучное выщелачивание совместно с бедной рудой.

При работе перегрузочного пункта с пустыми породами вибрационный грохот 6 выключен, а отверстия (щели) верхней просеивающей поверхности 7

перекрываются поворотными заслонками 17, в результате чего выделение мелкой фракции не производится и весь объем транспортабельных для ленточного конвейера 14 фракций напрямую подается в накопительный бункер 4.

### Практическое применение

Предлагаемое технико-технологическое решение может быть использовано для организации комбинированной схемы транспорта при разработке месторождений цветных и благородных металлов, некондиционная рудная масса которых характеризуется наличием продуктивной мелкой фракции. Автором рассмотрено одно из дальневосточных золоторудных месторождений, обрабатываемое открытым способом, в настоящее время глубина карьера превысила 140 м, а извлекаемые объемы горной массы достаточны для организации циклично-поточной схемы транспортирования. Параметры извлекаемых из карьера руд представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры извлекаемых из карьера руд и пустых пород

Table 1. Parameters of ores and waste rocks extracted from the quarry

Руда и пустые породы	Доля горной массы, %	Содержание металла, г/т	Среднее содержание металла, г/т	Доля металла в руде, %
Кондиционная руда	11,8	более 0,7	2,31	80,9
Некондиционная руда	14,0	0,3–0,7	0,46	19,1
Вскрышные и вмещающие породы	74,2	–	–	–
ИТОГО	100,0	–	–	100,0

Таким образом, на склад некондиционной руды попадает более 19% металла, содержащегося в добываемой руде.

Проведенные с участием автора экспериментальные исследования по определению содержания золота в пробе взорванной некондиционной руды забойной крупности рассматриваемого золоторудного месторождения, фракционированной по классам, показали значительную вариативность содержания металла, при этом мелкие классы (-15+10, -10+5 и -5+0 мм) существенно обогащены полезным компонентом, а крупные куски руды имеют содержание металла ниже среднего (рис. 2).

С учетом результатов эксперимента мелкую фракцию -15 мм некондиционной рудной массы, обогащенную полезным компонентом, можно отнести к продуктивной. В табл. 2 приведены результаты расчетов основных параметров мелкой и крупной фракций, соответственно обогащенной и обедненной полезным компонентом.



Рис. 2. Содержание золота во взорванной некондиционной руде по классам крупности

Fig. 2. Gold content in blasted substandard ore by grain-size class

Таблица 2. Основные параметры мелкой и крупной фракций

Table 2. Basic parameters of fine and coarse fractions

Фракция	Крупность, мм	Доля фракции, %	Содержание золота, г/т	Доля золота, %
Крупная (некондиционная)	+15	76,8	0,32	52,0
Мелкая (продуктивная)	-15	23,2	0,99	48,0
ИТОГО		100,0	0,48	100,0

Поскольку при содержании металла в пробе некондиционной рудной массы 0,48 г/т, продуктивная фракция -15 мм содержит 0,99 г/т, то при среднем содержании золота в некондиционной рудной массе 0,46 г/т (см. табл. 1) пропорционально можно принять содержание в продуктивной фракции -15 мм порядка 0,95 г/т. Содержание металла 0,95 г/т достаточно для рентабельной переработки рудной массы с применением метода кучного выщелачивания, при этом полученное сырье не требует дополнительного дробления.

Доля металла, находящегося в выделяемой из некондиционной рудной массы рассматриваемого месторождения посредством грохочения продуктивной мелкой фракции (подрешетного продукта), может быть определена по формуле

$$M_M = M_{HP} K_M E \cdot 10^{-4}, \quad (1)$$

где  $M_{HP} = 19,1\%$  – доля металла, содержащегося в некондиционной рудной массе (см. табл. 1);  $K_M$  – относительная доля металла, содержащегося в продуктивной мелкой фракции некондиционной рудной массы (см. табл. 2);  $E = 0,88$  – эффективность грохочения, определена согласно рекомендациям [29].

Расчет показывает, что выделение из некондиционной руды продуктивной мелкой фракции позволит дополнительно направить на переработку рудную массу, содержащую 8,1% всего извлекаемого из недр металла, таким образом, потери металла со складываемыми некондиционными рудами снизятся в 1,74

раза с 19,1 до 11,0%. Продуктивная мелкая фракция со средним содержанием золота 0,95 г/т после окомкования тонких классов (-3+0 мм) перерабатывается с применением кучного выщелачивания в отдельном штабеле или совместно с дробленой кондиционной рудой с содержанием 0,7–2 г/т. Кондиционная руда с содержанием металла более 2 г/т направляется для переработки на фабрику.

## Выводы

При ведении открытых горных работ образуется большое количество техногенных отходов, направляемых в отвалы вскрышных и минерализованных пород, а также штабеля некондиционной руды, в которых может содержаться существенная доля металла, извлекаемого из недр. На многих месторождениях цветных и благородных металлов для взорванной рудной массы характерно наличие повышенного содержания полезного компонента в мелкой фракции. Проведенные с участием автора исследования некондиционной руды одного из дальневосточных месторождений показали, что содержание золота в продуктивной мелкой фракции в 2,06 раза превышает среднее содержание металла в пробе.

Предложенная в статье конструкция усовершенствованного грохотильно-дробильного перегрузочного пункта, оснащенного вспомогательным оборудованием в виде виброгрохота, позволит выделять из некондиционной рудной массы обогащенную полезным компонентом продуктивную мелкую фракцию, что даст возможность в процессе освоения рассматриваемого месторождения дополнительно направить на переработку с применением кучного выщелачивания рудную массу, содержащую более 8% добываемого из недр металла. Удаление из складываемых некондиционных руд основной части рудной мелочи позволит существенно снизить потери золота с техногенными отходами, а также уменьшить нагрузку на окружающую среду, связанную с пылением штабелей некондиционной руды и образованием токсичных компонентов при воздействии на данные штабеля атмосферных осадков.

## Список источников

- Оганесян Л.В., Мирлин Е.Г. Проблема истощения минерально-сырьевых ресурсов земной коры // Горная промышленность. 2019. №6. С. 100-105.
- Adams M. D. Gold Ore Processing: Project Development and Operations. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2016. 980 p.
- Инновационные технологии переработки упорных и бедных руд золота как основа рационального недропользования / Б.К. Михайлов, Г.В. Седелникова, Б.И. Беневоляский, А.И. Романчук // Руды и металлы. 2014. №1. С. 5-8.
- Espinoza R.D., Rojo J. Towards sustainable mining (Part I): Valuing investment opportunities in the mining sector // Resources Policy. 2017, vol. 52, pp. 7-18.
- Струков К.И., Рыльникова М.В. Проблемы и перспективы развития «Южуралзолото Группы компаний» в



- условиях проявления глобальных вызовов // Горная промышленность. 2021. №1. С. 54–60.
6. A transitional perspective of global and regional mineral material flows / Baninla Y., Zhang M., Lu Y., Liang R., Zhang Q., Zhou Yu., Khan K. // Resources, Conservation and Recycling. 2019, vol. 140, pp. 91-101.
  7. Научное обоснование технологий комплексного ресурсосберегающего освоения месторождений стратегического минерального сырья / К.Н. Трубецкой, Д.Р. Каплунов, С.Д. Виктор, М.В. Рыльникова, Д.Н. Радченко // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. №12. С. 5-12.
  8. Sekisov G.V., Cheban A.Y. Low-waste mining technology for structurally complex deposits with mixed-type process flows of ore extraction and processing // Journal of Mining Science. 2021, vol. 57, no. 6, pp. 978-985.
  9. Jarvie-Eggart M.E. Responsible Mining: Case Studies in Managing Social & Environmental Risks in the Developed World. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015. 804 p.
  10. Sekisov A., Rasskazova A. Assessment of the possibility of hydrometallurgical processing of low-grade ores in the oxidation zone of the Malmzyh cu-au porphyry deposit // Minerals. 2021, vol. 11, no. 1, pp. 1-11.
  11. Wu J., Ahn J., Lee J. Comparative leaching study on conical chalcite and chalcopyrite under different leaching systems // Korean Journal of Metals and Materials. 2019, vol. 57, no. 4, pp. 245-250.
  12. Снитка Н.П., Наимова Р.Ш. Направления комплексного использования техногенных ресурсов при открытой разработке месторождения Мурунтау // Горный журнал. 2018. №9. С. 57-61.
  13. World mineral loss and possibility to increase ore recovery ratio in mining production / Zhang Z.X., Hou D.F., Aladejare A., Ozoji T., Qiao Y. // International Journal Of Mining Reclamation And Environment. 2021, vol. 35, no. 9, pp. 670-691.
  14. Маринин М.А., Маринина О.А., Рахманов Р.А. Методический подход к оценке влияния гранулометрического состава взорванной горной массы на стоимость транспортных работ // Горный журнал. 2023. №9. С. 28-34.
  15. Совершенствование логистической схемы Светлинского рудника при переходе на циклично-поточную технологию / А.Г. Шадрунов, С.А. Саблев, И.А. Пыгалева, О.В. Фридрихсон // Известия Тульского государственного университета. Науки и Земле. 2020. №4. С. 535-547.
  16. Lucio J.C., Senra C.T., Souza. A. Paving the future – A case study replacing truck-and-shovels by shovel-and-conveyor continuous mining at Carajas open pit mines // IronOre 2009 Conference. Perth, WA. July 27-29, pp. 269-276.
  17. Minkin A., Wolpers F.M., Hellmuth T. Overcoming a mines embankment: IPCG system with new belt conveying concept for steep opencast minewalls // Bulk Solids Handling. 2019, vol. 37, no. 2, pp. 18-23.
  18. Мальгин О.Н., Кустов А.М., Коломников С.С. Развитие циклично-поточной технологии в транспортной системе карьера «Мурунтау» // Горный журнал. 2007. №5. С. 33-37.
  19. Исмаилов Т.Т., Голик В.И., Дольников Е.Б. Специальные способы разработки месторождений полезных ископаемых. М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2006. 331 с.
  20. Ilankoon I.M.S.K., Tang Y., Ghorbani Y. The current state and future directions of percolation leaching in the Chinese mining industry: Challenges and opportunities // Minerals Engineering. 2018, vol. 125, pp. 206-222.
  21. А.с. 1120104 СССР. Способ формирования качества руд при добыче и рудоскат для его осуществления / В.А. Шестаков, В.А. Хакулов, Г.А. Семочкин. Опубл. 23.10.1984. Бюл. № 39.
  22. Переработка руд с использованием современной технологии крупнокусковой фотометрической сепарации / И.В. Чепрасов, А.И. Романчук, А.А. Твердов, С.Б. Никишичев, И.А. Иванов // Золото и технологии. 2014. №1. С. 62-66.
  23. Самихов Ш.Р., Зинченко З.А., Бобохонов Б.А. Полупромышленные испытания отвального выщелачивания забалансовой руды месторождения Джилау // Золото и технологии. 2013. №3. С. 54-57.
  24. Чебан А.Ю. Ресурсосберегающая технология формирования отвалов с использованием модернизированного отвалообразователя // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 14-21.
  25. Наимова Р.Ш. Перспективы использования вскрышных пород карьера Мурунтау в качестве резервного сырьевого источника // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. №3. С. 117-122.
  26. Кантемиров В.Д., Титов Р.С. Оптимизация параметров карьерных грохотильно-перегрузочных пунктов // Известия Уральского государственного горного университета. 2020. №3. С. 107-114.
  27. Чебан А.Ю. Способ выемки взорванной горной массы экскаватором при разработке сложноструктурных месторождений // Маркшейдерский вестник. 2020. №2. С. 66-70.
  28. Лашко В.Т. Перегрузочные пункты при автомобильно-конвейерном транспорте на рудных карьерах. Днепропетровск: Полиграфист, 2001. 140 с.
  29. Егоров П.В., Бобер Е.А., Кузнецов Ю.Н. Основы горного дела. М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2006. 408 с.

## References

1. Oganessian L.V., Mirlin E.G. Issues of resource depletion in earth crust. *Gornaya promyshlennost* [Mining industry], 2019;(6):100-105. (In Russ.)
2. Adams M. D. Gold Ore Processing: Project Development and Operations. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2016, 980 p.
3. Mikhailov B.K., Sedelnikova G.V., Benevolsky B.I., Romanchuk A.I. Innovative technologies for processing refractory and low-grade gold ores as the basis for rational subsoil use. *Rudy i metally* [Ores and metals], 2014;(1):5-8. (In Russ.)
4. Espinoza R.D., Rojo J. Towards sustainable mining (Part I): Valuing investment opportunities in the mining sector. *Resources Policy*. 2017;52:7-18.
5. Strukov K.I., Rylnikova M.V. Issues and prospects for the development of Uzhuralzoloto group of companies in conditions of global challenges. *Gornaya promyshlennost* [Mining industry], 2021;(1):54-60. (In Russ.)
6. Baninla Y., Zhang M., Lu Y., Liang R., Zhang Q., Zhou Yu., Khan K. A transitional perspective of global and regional mineral material flows. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019;140:91-101.

7. Trubetskoy K.N., Kaplunov D.R., Viktorov S.D., Rylnikova M.V., Radchenko D.N. Scientific rationale of technologies for comprehensive resource-saving exploitation of strategic mineral resources. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2014;(12):5-12. (In Russ.)
8. Sekisov G.V., Cheban A.Y. Low-waste mining technology for structurally complex deposits with mixed-type process flows of ore extraction and processing. *Journal of Mining Science*. 2021;57(6):978-985.
9. Jarvie-Eggart M.E. Responsible Mining: Case Studies in Managing Social & Environmental Risks in the Developed World. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015. 804 p.
10. Sekisov A., Rasskazova A. Assessment of the possibility of hydrometallurgical processing of low-grade ores in the oxidation zone of the Malmyzh cu-au porphyry deposit. *Minerals*. 2021;11(1):1-11.
11. Wu J., Ahn J., Lee J. Comparative leaching study on conical chalcite and chalcopryite under different leaching systems. *Korean Journal of Metals and Materials*. 2019;57(4):245-250.
12. Snitka N.P., Naimova R.Sh. Directions for the integrated use of technogenic resources during open-pit mining of the Muruntau deposit. *Gorniy zhurnal* [Mining Journal], 2018;(9):57-61. (In Russ.)
13. Zhang Z.X., Hou D.F., Aladejare A., Ozoji T., Qiao Y. World mineral loss and possibility to increase ore recovery ratio in mining production. *International Journal Of Mining Reclamation And Environment*. 2021;35(9):670-691.
14. Marinin M.A., Marinina O.A., Rakhmanov R.A. Methodological approach to assessing influence of blasted rock fragmentation on mining costs. *Gorniy zhurnal* [Mining Journal], 2023;(9):28-34. (In Russ.)
15. Shadrinov A.G., Sablev S.A., Pytalev I.A., Friedrichson O.V. Improvement of the Svetlinsky gold deposit logistics scheme with transition to cycle-flow technology. *Izvestiya Tula gosudarstvennogo universiteta. Ser. Nauki o Zemle* [Izvestiya Tula State University Earth Science Series], 2020;(4):535-547. (In Russ.)
16. Lucio J.C., Senra C.T., Souza. A. Paving the future – A case study replacing truck-and-shovels by shovel-and-conveyor continuous mining at Carajas open pit mines // IronOre 2009 Conference. Perth, WA. July 27-29, pp. 269-276.
17. Minkin A., Wolpers F.M., Hellmuth T. Overcoming a mines embankment: IPCG system with new belt conveying concept for steep opencast minewalls. *Bulk Solids Handling*. 2019;37(2):18-23.
18. Malgin O.N., Kustov A.M., Kolomnikov S.S. Development of the cyclic and continuous flow technology in transportation system of muruntau quarry. *Gorniy zhurnal* [Mining Journal], 2007;(5):33-37. (In Russ.)
19. Ismailov T.T., Golik V.I., Dolnikov E.B. *Spetsialnye sposoby razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* [Special methods for developing mineral deposits]. Moscow: Moscow State Mining University, 2006, 331 p. (In Russ.)
20. Ilankoon I.M.S.K., Tang Y., Ghorbani Y. The current state and future directions of percolation leaching in the Chinese mining industry: Challenges and opportunities. *Minerals Engineering*. 2018;125:206-222.
21. Shestakov V.A., Khakulov V.A., Semochkin G.A. Method for forming the quality of ores during mining and ore roll for its implementation. Author's certificate USSR, no. 1120104, 1984.
22. Cheprasov I.V., Romanchuk A.I., Tverdov A.A., Nikishichev S.B., Ivanov I.A. Processing of ores using modern technology of large-piece photometric separation. *Zoloto i tekhnologii* [Gold and technology], 2014;(1):62-66. (In Russ.)
23. Samikhov Sh.R., Zinchenko Z.A., Bobokhonov B.A. Semi-industrial testing of dump leaching of off-balance ore from the Jilau deposit. *Zoloto i tekhnologii* [Gold and technology], 2013;(3):54-57. (In Russ.)
24. Cheban A.Yu. Resource-saving technology for dump formation using a modernized spreader. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Magnitogorsk State Technical University G.I. Nosov], 2024;22(2):14-21. (In Russ.)
25. Naimova R.Sh. Prospects for the use of overburden rocks from the Muruntau quarry as a reserve source of raw materials. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2011;(3):117-122. (In Russ.)
26. Kantemirov V.D., Titov R.S. Optimization of parameters of open-pit screening and dumping stations. *Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], 2020;(3):107-114. (In Russ.)
27. Cheban A.Yu. Method for excavation of the exploded rock mass when developing complex deposits. *Marksheiderskiy vestnik* [Mine Surveyor Bulletin], 2020;(2):66-70. (In Russ.)
28. Lashko V.T. *Peregruzochnye punkty pri avtomobilno-konveyernom transporte na rudnykh karerakh* [Transshipment points for automobile-conveyor transport in ore mines]. Dnepropetrovsk: Polygraphist, 2001, 140 p. (In Russ.)
29. Egorov P.V., Bober E.A., Kuznetsov Yu.N. *Osnovy gornogo dela* [Fundamentals of Mining]. Moscow: Moscow State Mining University, 2006, 408 p. (In Russ.)

Поступила 10.07.2024; принята к публикации 09.09.2024; опубликована 30.06.2025  
Submitted 10/07/2024; revised 09/09/2024; published 30/06/2025

**Чебан Антон Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИГД ХФИЦ ДВО РАН), Хабаровск, Россия.  
Email: chebanay@mail.ru. ORCID 0000-0003-2707-626X

**Anton Yu. Cheban** – PhD (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher, Mining Institute of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (MI KhFRC FEB RAS), Khabarovsk, Russia.  
Email: chebanay@mail.ru. ORCID 0000-0003-2707-626X



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.012

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-35-40

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ РАЗЛИЧНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ДЛЯ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Кисляков В.Е., Федотов А.С., Снетков Д.С., Шварцкопф А.В.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.

**Аннотация.** Актуальность работы. Поддержка заданного уровня качества добываемой продукции – задача, которая занимает лидирующую позицию на любом производстве, в особенности при добыче рудных полезных ископаемых. Но требования к качеству угольной продукции не менее основательны, поэтому вопросы зависимости и взаимосвязи качественных характеристик угольных месторождений имеют актуальность. Учитывая неоспоримый факт того, что качество в недрах невозможно изменить, проектировщики, исследователи и технические специалисты на производстве вынуждены изыскивать наиболее эффективные методы прогнозирования качества при добыче и складировании полезного ископаемого и совершенствовать методы по стабилизации потока добываемой продукции. Большинство исследований предлагает методы управления качеством при добыче путем его усреднения или обогащения. Несмотря на высокую эффективность, такой процесс увеличивает время получения финальной продукции, а следовательно, и затраты и может быть осложнен высокой вариативностью качества продукции, поступающей из разреза. Поэтому стабильность потока играет ключевую роль в получении продукции заданного качества. **Цель работы.** Проанализировать месторождение на предмет зависимостей распределения качества угля для их дальнейшего использования в процессе управления качеством продукции. **Используемые методы.** В статье использован метод корреляционного анализа для обнаружения зависимостей распределения. **Новизна.** Результаты работы позволят разработать новый подход в обосновании высоты добычного уступа, с учетом не только параметров техники, но и особенностей распределения качества. **Результаты работы.** Настоящее исследование включает в себя обобщенные результаты анализа угольных проб и выявление зависимостей распределения качества в границах пласта. **Выводы.** Определенная зависимость дает возможность наиболее точно прогнозировать качество полезного ископаемого и тем самым позволит определить направление и параметры горных работ, при которых будет достигнута минимальная вариация уровня качества. **Практическая значимость.** Применение результатов работы на практике позволит стабилизировать уровень качества продукции, поставляемой из разреза, тем самым снизив затраты на операции по усреднению.

**Ключевые слова:** уголь, зольность, зависимость, качество, буроугольные месторождения

© Кисляков В.Е., Федотов А.С., Снетков Д.С., Шварцкопф А.В., 2025

### Для цитирования

Исследование взаимосвязи различных показателей качества для угольных месторождений / Кисляков В.Е., Федотов А.С., Снетков Д.С., Шварцкопф А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 35-40. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-35-40>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# INVESTIGATION OF THE INTERCONNECTION BETWEEN VARIOUS QUALITY INDICATORS FOR COAL DEPOSITS

Kislyakov V.E., Fedotov A.S., Snetkov D.S., Shwartskopf A.V.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** Maintaining a given level of quality of the extracted products is a task that occupies a leading position in any production, especially in the extraction of ore minerals. But the requirements for the quality of coal products are no less fundamental, so the issues of dependence and interrelation of the quality characteristics of coal deposits are relevant. Given the indisputable fact that the quality in the subsoil cannot be changed, designers, researchers and technical specialists in production are forced to seek the most effective methods for predicting the quality during the extraction and storage of minerals and improve methods for stabilizing the flow of extracted products. Most studies suggest quality management methods during extraction by averaging or enrichment. Despite the high efficiency, such a process increases the time for obtaining the final product, and, consequently, costs and can be complicated by the high variability of the quality of the products coming from the open pit. Therefore, flow stability plays a key role in obtaining products of a given quality. **Objective.** Is to analyze the deposit for coal quality distribution dependencies for their further use in the product quality management process. **Methods used.** The article uses the correlation analysis method to detect distribution dependencies. **Originality.** The results of the work will allow developing a new approach to substantiating the height of the mining bench, taking into account not only the equipment parameters, but also the discovered dependence. **Results.** This study includes generalized results of coal sample analysis and identification of quality distribution dependencies within the seam boundaries. **Conclusions.** A certain dependence makes it possible to most accurately predict the quality of the mineral and thus will allow determining the direction and parameters of mining operations, in which the minimum variation in quality levels will be achieved. **Practical Relevance.** The application of the results of the work in practice will allow stabilizing the quality level of the products supplied from the open pit, thereby reducing the costs of averaging operations.

**Keywords:** coal, ash content, dependence, quality, lignite deposits

## For citation

Kislyakov V.E., Fedotov A.S., Snetkov D.S., Shwartskopf A.V. Investigation of the Interconnection Between Various Quality Indicators for Coal Deposits. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 35-40. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-35-40>

## Введение

Угли буроугольных месторождений широко используются в различных сферах жизнедеятельности. Согласно ГОСТ 25543-2013 бурые угли разделяют на три группы (1Б, 2Б, 3Б). Бурые угли могут быть использованы в различных сферах производства как в качестве основного продукта, так и в качестве «добавок». Как и любое другое полезное ископаемое, бурый уголь обладает своими характерными свойствами, которые изменяются в широких диапазонах.

Повлиять на уровень качества угля непосредственно в недрах невозможно, но существует возможность его прогнозировать и им управлять в процессе технологических переделов с применением усреднения, сортировки или обогащения [1–3]. Уровень качества угля напрямую зависит от применяемой технологии [4, 5], а конечная стоимость угля напрямую зависит от его качества, как на внутреннем, так и на международном рынке [6, 7]. В то же время усложнения технологии добычи угля, при которой не снижается качество, соответственно, ведут к увеличению капитальных и эксплуатационных затрат,

которые увеличивают себестоимость добычи. Поэтому выявление зависимостей распределения качественных характеристик позволяет повысить уровень стабильности потока продукции и играет важную роль в исследовании месторождений. Обнаруженные зависимости позволяют точно спрогнозировать изменчивость качества при разработке месторождения и вовремя принять технологические и организационные меры для его стабилизации. Для этого необходимо исследовательским путем определить взаимозависимость основных качественных характеристик [8, 9], чтобы в дальнейшем прогнозировать его изменение.

Объект исследования – Большесырское бурогоугольное месторождение.

Предмет исследования – качественные характеристики полезного ископаемого рассматриваемого объекта и их взаимозависимость. Основное внимание в исследовании уделено зольности угля.

## Описание и выбор оцениваемых показателей качества

При разведке месторождений и техническом анализе угольных проб определяют широкий спектр ха-



рактических как лабораторным, так и расчетным путем. Часть определяемых характеристик занимает свое место в описании уровня качества продукции, а другая часть применима при определении марок угля и его вторичных свойств.

В связи с тем, что основное направление использования угля — это сжигание на тепловых электрических станциях (ТЭС), далее приведено краткое описание качественных характеристик, по которым можно оценить или охарактеризовать уголь, который может быть использован на ТЭС.

*Теплота сгорания* ( $Q_{\text{гн}}$ , ккал/кг) — показатель, напрямую влияющий на производительность котлов. Низкий уровень теплоты сгорания снижает производительность станций и требует комплекс мероприятий по сжиганию. Следует отметить, что слишком высокая теплота сгорания также негативно влияет на экономичность, так как возрастает шлакование топок, а также происходит повышение экологической нагрузки за счет увеличения количества вредных выбросов.

*Выход летучих веществ* ( $V^{\text{daf}}$ , %) демонстрирует возможность воспламенения и устойчивого горения угля в топочной камере. Также уровень выхода летучих веществ влияет на взрывобезопасность угля при его размельчении.

*Влажность угля (рабочая)* ( $W_p$ , %) — один из главных показателей, характеризующих уголь. Уровень влажности угля влияет на сыпучесть продукта при разгрузке и перемещении по конвейерным лентам. При повышенном уровне влаги увеличивается нагрузка на сушильное оборудование [10] или происходит недостаточная просушка, что, в свою очередь, приводит к снижению производительности оборудования. Поэтому уровень влаги является одной из главных характеристик угля.

*Зольность* ( $A$ , %) представляет собой отношение массы несгораемого остатка (зола) к сожженной массе угля. Увеличение золы, как и увеличение влаги, наиболее нежелательны в связи с понижением теплотворной способности угля, трудностей использования.

Различают внутреннюю и внешнюю зольности. Внутренняя зольность образуется за счет включений, находящихся непосредственно в угле, а внешняя — за счет засорения угля пустыми породами в процессе добычи. Увеличение зольности приводит к увеличению занимаемых площадей под отходы золошлаков [11] и повышению экологической нагрузки, а также к увеличению платы за размещение отходов.

По опыту эксплуатации предприятий зольность — определяющий фактор в оценке качества угля. Анализ ТЭО кондиций по месторождениям каменного и бурого углей подтверждает данное суждение, так как основные параметры кондиций представлены такими характеристиками, как минимальная выемочная мощность и зольность, а такие характеристики, как теплота сгорания, влажность, выход летучих веществ, представляют как дополнительные характеристики и

не включают в перечень параметров кондиций, что подтверждает важность зольности в качественной оценке угля, поэтому в дальнейшем ходе исследований наибольшее внимание уделено анализу распределения зольности угля.

### Порядок исследования

На первом этапе исследования произведен поиск и оценка влияния на зольность пласта таких характеристик, как влажность, выход летучих веществ, мощность пласта (рис. 1-3). Для исследования использованы данные результатов технического анализа угольных проб в процессе геологоразведки Больше-сырского буроугольного месторождения.

Ввиду того, что показатели качества изменяются в широких пределах, все данные были разделены на несколько характерных групп, по которым произведены дальнейшие исследования. Группы формировались по интервалам мощности пласта от <5 до > 35 м с шагом интервала 5 м. Результат распределения представлен на рис. 4.

По представленным диаграммам рассеяния сделан вывод о том, что наибольшее влияние на зольность оказывает мощность пласта, но рассмотрение всей совокупности данных не отражает достоверной зависимости. Далее произведено изучение зависимости зольности от мощности пласта по каждой скважине.

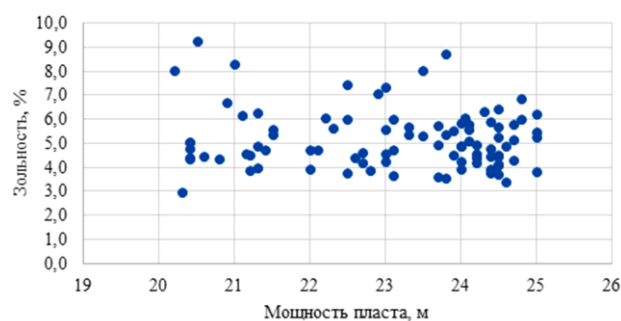


Рис. 1. Рассеяние зольности в зависимости от мощности пласта (мощность пласта 20–25 м)

Fig. 1. Ash content dispersion depending on the seam thickness (seam thickness 20–25 m)

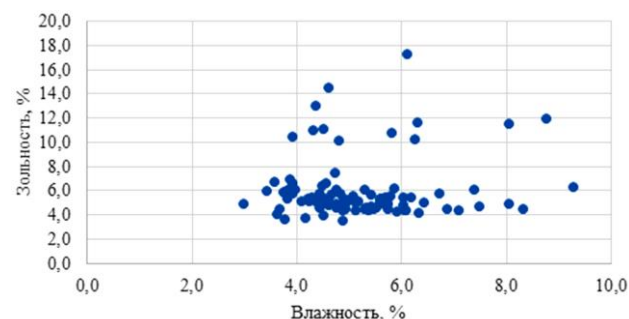


Рис. 2. Рассеяние зольности в зависимости от влажности угля (мощность пласта 20–25 м)

Fig. 2. Ash content dispersion depending on coal moisture content (seam thickness 20–25 m)

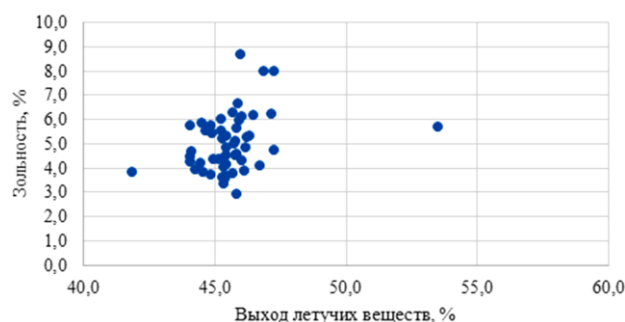


Рис. 3. Рассеяние зольности в зависимости от величины выхода летучих веществ (мощность пласта 20–25 м)

Fig. 3. Ash content dispersion depending on the value of the volatile matter yield (seam thickness 20–25 m)

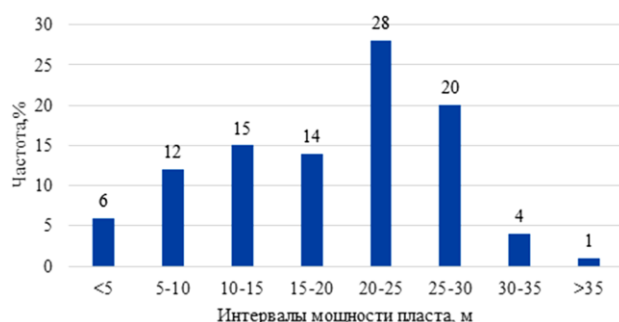


Рис. 4. Гистограмма распределения мощности пласта по исследуемым интервалам

Fig. 4. Histogram of the distribution of the reservoir thickness across the studied intervals

Для каждой группы интервалов по каждой скважине, входящей в интервал, произведено исследование зависимости зольности от расстояния от кровли до оцениваемой точки. Так как мощность исследуемого пласта изменяется в широком диапазоне, для каждой исследуемой точки было определено относительное расстояние от кровли пласта до исследуемой пробы по следующей формуле:

$$dh = \frac{h_i}{h_{max}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $h_i$  – расстояние от кровли пласта до оцениваемой точки, м;  $h_{max}$  – максимальная мощность пласта в оцениваемой точке, м.

Переход к относительным значениям расстояния позволит корректно сравнивать полученные результаты для разных диапазонов мощности пласта. Интервалы с мощностью менее 5 м в исследование не включены в связи с малым количеством проб на одно пластопересечение.

Для наглядного представления на рис. 5 изображен характерный график найденной зависимости зольности от относительного расстояния от кровли по

случайной выборке скважин. По представленному графику можно отметить тенденцию уменьшения зольности при отдалении от кровли пласта и последующем увеличении зольности при приближении к почве.



Рис. 5. График изменчивости зольности угля от относительного расстояния от кровли пласта

Fig. 5. Graph of variability of coal ash content from relative distance from the seam roof

Скважины по каждому интервалу мощности проанализированы на предмет наличия зависимости распределения зольности. Результаты на основании корреляционного анализа по интервалам пласта приведены в таблице.

Таблица. Результаты анализа изменчивости зольности по интервалам

Table. Results of the analysis of ash content variability by intervals

Интервал исследования	Количество исследуемых скважин	Коэффициент корреляции		Средний $R^2$
		минимальный	максимальный	
<5	–	–	–	–
5-10	41	0,14	1,00	0,86
10-15	50	0,05	1,00	0,82
15-20	47	0,07	1,00	0,71
20-25	94	0,00	0,99	0,63
25-30	67	0,00	0,94	0,60
30-35	12	0,01	0,98	0,41
>35	1	0,54	0,54	0,54

На основании таблицы можно сделать вывод о том, что на каждом интервале мощности пласта подтверждается искомая зависимость изменения зольности, пример которой приведен на рис. 5 по случайной выборке скважин. По результатам анализа определен процент скважин относительно их общего количества, в которых подтверждается искомая зависимость распределения зольности. Распределение представлено на рис. 6.

Разделение скважин по коэффициенту корреляции позволит выделять зоны с различным уровнем прогноза значений зольности, что, в свою очередь, дает возможность учесть распределение зольности при определении направления развития горных работ.

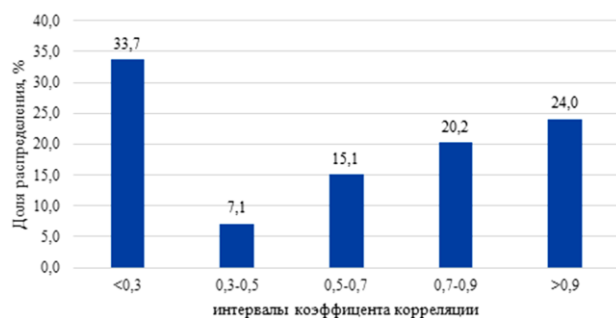


Рис. 6. Гистограмма распределения коэффициента корреляции относительно общего количества скважин

Fig. 6. Histogram of the distribution of the correlation coefficient relative to the total number of drillholes

Результаты анализа блочной модели Большесырского месторождения подтверждают найденную зависимость. Для подтверждения были проанализированы случайные блоки модели между разведочными скважинами, на которых также прослежена зависимость зольности от относительного расстояния от кровли.

В процессе исследований также были рассмотрены месторождения каменного угля (Никольское и Бейское). В поисках зависимости, представленной на рис. 5, сделан вывод о том что, отмеченная тенденция выявлена по ряду скважин, но учитывая то, что пласты каменного угля имеют большое количество углистых и породных включений, искомая зависимость по многим скважинам не подтверждена. Кроме того, мощность проанализированных пластов изменяется в широких пределах и при мощности пласта 10 м и менее количество опробований на одно пластопересечение не позволяет корректно оценить изменчивость зольности, поэтому приведенный подход к исследованию наиболее целесообразно применять на месторождениях с выдержанной мощностью пласта от 10-15 м и более. Подтверждения искомой зависимости на других буровугольных месторождениях приведено в работе [12].

### Выводы

Результаты поиска зависимостей распределения качественных характеристик демонстрируют явную изменчивость зольности пласта в зависимости от расстояния от кровли до оцениваемой точки. Выявленная зависимость подтверждает теорию о том, что зольность пласта может быть спрогнозирована на основании выявленных закономерностей распределения, а учет найденной закономерности позволит наиболее рационально выбирать направление развития горных работ и параметры выемочных слоев (высота уступа/подступа) с целью достижения наиболее стабильного и однородного потока угля, поступающего из разреза.

Практическая значимость заключается в том, что выявленные закономерности позволяют учитывать из-

менчивость зольности по высоте пласта и выбирать направления развития горных работ и высоту добычного уступа таким образом, чтобы получать наиболее стабильный поток (по качеству) продукции, что, в свою очередь, снизит временные и финансовые затраты на усреднение, а следовательно, повысит эффективность освоения месторождения. Наиболее однородное по качеству сырье, поставляемое потребителю, которым в основном являются ТЭС, повысит их производительность и снизит возможные внеплановые технологические простои, связанные со шлакованием и прочими технологическими издержками.

Представленный подход исследования наиболее допустим к применению при мощности пласта 10 м и более, так как при меньшей мощности пласта количество проб на одно пластопересечение не позволяет корректно оценить изменчивость зольности.

### Список источников

1. Красильников А.Е. Тенденции формирования стабильного качества угля при открытой добыче // Вестник Забайкальского государственного университета. 2013. №1. С. 27-31.
2. Усреднение качества бурого угля на Харанорском буровугольном месторождении / Овешников Ю.М., Субботин Ю.В., Авдеев П.Б., Самойленко А.Г. // ГИАБ. 2016. №4. С. 326-337.
3. Маниковский П. М. Управление безопасным качеством углей с использованием цифровых моделей полезного ископаемого на Кутинском буровугольном месторождении // Вестник Забайкальского государственного университета. 2023. Т. 29, № 2. С. 8–23. DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-2-8-23.
4. Управление качеством бурых углей Харанорского месторождения / Субботин Ю.В., Овешников Ю.М., Самойленко А.Г., Циношкин Г.М. // ГИАБ. 2012. №4. С. 64-72.
5. Азев В.А., Попов Д.В. Обоснование технологических параметров разработки пластовых месторождений с невыдержанными характеристиками залегания и качества угля // Уголь. 2022. № 2. С. 14-21. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-2-14-21.
6. Эпштейн С. А., Шинкин В. К. Показатели качества угля для разных направлений // ГИАБ. 2022. №4. С.5-16. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_4\_0\_5.
7. Швабенланд Е.Е., Лаптева М.И. Принципы управления качеством минерального сырья при комбинированной разработке сложноструктурных месторождений // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2021. №3. С. 326-335.
8. Waterman Sulistyana Bargawa, Harry H. Syahputra. Coal quality study using multivariate geostatistics. AIP Conf. Proc. 23 November 2021; 2363 (1): 030012. <https://doi.org/10.1063/5.0061103>
9. Andrew P. Richards, Denver Haycock, Jacob Frandsen, Thomas H. Fletcher. A review of coal heating value correlations with application to coal char, tar, and other fuels, Fuel. 2021, vol. 283, 118942. ISSN 0016-2361. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118942>.
10. Козлов В.А. Влияние химического состава золы угля на эксплуатационные параметры топок // ГИАБ. 2012. №10. С.205-211.

11. Хакимуллин Б.Р., Гумеров И.Р., Зайнуллин Р.Р. Экологические проблемы современных тепловых электростанций // Теория и практика современной науки. 2017. №3 (21). С.763-766.
12. Снетков Д.С., Косолапов А.И. Оценка возможности управления качеством угля на буроголовых месторождениях края // ГИАБ. 2015. №S1-2. С.15-23.

### References

1. Krasilnikov A.E. Developments of stable coal quality formation during open-pit mining. *Vestnik ZabGU* [Bulletin of Zabaikalsky State University], 2013;(1):27-31. (In Russ.)
2. Oveshnikov Yu.M., Subbotin Yu.V., Avdeev P.B., Samoylenko A.G. Averaging of brown coal quality at the Kharanorskoye brown coal deposit. *GIAB* [MIAB], 2016;(4):326-337. (In Russ.)
3. Manikovsky P. M. Safe coal quality management using digital models of the mineral in the Kutinskoye brown coal deposit. *Vestnik Zabajkalskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Transbaikalian State University], 2023;29(2):8-23. (In Russ.) DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-2-8-23.
4. Subbotin Yu.V., Oveshnikov Yu.M., Samoylenko A.G., Tsinoshin G.M. Quality management of brown coals of the Kharanorskoye deposit. *GIAB* [MIAB], 2012;(4):64-72. (In Russ.)
5. Azev V.A., Popov D.V. Justification of technological parameters for the development of bedded deposits with uneven high-quality occurrences and coal quality. *Ugol* [Coal], 2022;(2):14-21. (In Russ.) DOI: 10.18796/0041-5790-2022-2-14-21.
6. Epshteyn S.A., Shinkin V.K. Coal quality indicators for different directions. *GIAB* [MIAB], 2022;(4):5-16. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_4\_0\_5.
7. Shvabenland E.E., Lapteva M.I. Principles of mineral raw material quality management in the combined development of complex structural deposits. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle* [Bulletin of Tula State University. Earth Sciences], 2021;(3):326-335. (In Russ.)
8. Bhargava W.S., Syahputra H.H. Coal quality study using multivariate geostatistics. AIP Conference. Textbook. 2021;2363(1): 030012. <https://doi.org/10.1063/5.0061103>.
9. Andrew P. Richards, Denver Haycock, Jacob Frandsen, Thomas H. Fletcher. A review of coal heating value correlations with application to coal char, tar, and other fuels. *Fuel*. 2021;283:118942. ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118942>.
10. Kozlov V.A. Analysis of the chemical composition of ash coals on the economic parameters of furnaces. *GIAB* [MIAB], 2012;(10):205-2011. (In Russ.)
11. Khakimullin B.R., Gumerov I.R., Zainullin R.R. Environmental problems of modern thermal power plants. *Teoriya i praktika sovremennoy nauki* [Theory and practice of modern science], 2017;(3(21)):763-766. (In Russ.)
12. Snetkov D.S., Kosolapov A.I. Assessment of the possibilities of managing American coals at brown coal deposits of the region. *GIAB* [MIAB], 2015;(C1-2):15-23. (In Russ.)

Поступила 29.11.2024; принята к публикации 06.01.2025; опубликована 30.06.2025  
Submitted 29/11/2024; revised 06/01/2025; published 30/06/2025

**Кисляков Виктор Евгеньевич** – доктор технических наук, профессор кафедры открытых горных работ, Институт цветных металлов, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.  
Email: vkislyakov@sfu-kras.ru

**Федотов Артем Сергеевич** – аспирант кафедры открытых горных работ, Институт цветных металлов, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.  
Email: ar.fedotow@yandex.ru. ORCID 0009-0005-9552-2956

**Снетков Дмитрий Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры открытых горных работ, Институт цветных металлов, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.  
Email: ar.fedotow@yandex.ru.

**Шварцкопф Андрей Валериевич** – аспирант кафедры открытых горных работ, Институт цветных металлов, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.  
Email: ar.fedotow@yandex.ru.

**Viktor E. Kislyakov** – DrSc (Eng.), Professor of the Opencast Mining Department of the Institute of Non-Ferrous Metals of the Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.  
Email: vkislyakov@sfu-kras.ru

**Artem S. Fedotov** – Postgraduate Student of the Opencast Mining Department of the Institute of Non-Ferrous Metals of the Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.  
Email: ar.fedotow@yandex.ru. ORCID 0009-0005-9552-2956.

**Dmitry S. Snetkov** – PhD (Eng.), Associate Professor of the Opencast Mining Department of the Institute of Non-Ferrous Metals of the Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.  
Email: ar.fedotow@yandex.ru.

**Andrey V. Schwarzkopf** – Postgraduate Student of the Opencast Mining Department of the Institute of Non-Ferrous Metals of the Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.  
Email: ar.fedotow@yandex.ru.



# МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

## METALLURGY OF FERROUS, NON-FERROUS AND RARE METALS

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 669.162.16

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-41-49



### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ КРУПНОСТИ КОКСА НА ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ПО РАДИАЛЬНЫМ ЗОНАМ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗАГРУЗКИ И ДУТЬЯ

Харченко А.С.<sup>1</sup>, Павлов А.В.<sup>2</sup>, Юдина С.В.<sup>1</sup>, Сибгатуллин С.К.<sup>1</sup>, Свечникова Н.Ю.<sup>1</sup>, Юдин Д.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

<sup>2</sup> Магнитогорский металлургический комбинат, Магнитогорск, Россия

**Аннотация.** Постановка задачи (актуальность работы). Для достижения низкого удельного расхода кокса и высокой производительности при выплавке чугуна важным условием является рациональное распределение компонентов поступающей шихты и отводимого доменного газа в колошниковом пространстве доменной печи. Его воздействие способно обеспечить высокую эффективность противоточного развития восстановительных и тепловых процессов, ровный сход шихты без подвисаний. **Цель работы.** Математическим моделированием оценить влияние на температуру газа в периферийной, осевой зонах колошника и рудном гребне изменения параметров, характеризующих режимы загрузки и дутья в интервале эквивалентной крупности кокса 50,0–57,5 мм. Выявить статистические зависимости соотношения температур по кольцевым сечениям от влияющих параметров и направления применения их для корректировки технологического процесса. **Результат.** Согласно выполненным исследованиям на печах с лотковым загрузочным устройством увеличение крупности кокса сопровождалось самопроизвольным его перераспределением, которое зависело от дутьевых характеристик и параметров загрузки, в том числе от исходного режима набора компонентов шихты в колошниковое пространство. Выявлены статистические зависимости соотношения температур между периферией, рудным гребнем и осевой зоной колошника от параметров загрузки и характеристик дутья. Математическим моделированием установлено, что при доле железорудного сырья в совместной массе железорудного сырья и кокса, поступающей в колошниковое пространство печи со станций углового положения лотка № 9-11, 6-8 и 3-5 в пределах соответственно 100, 43,7-47,1 и 42,6%, самопроизвольное перераспределение кокса при увеличении его эквивалентной крупности направлено преимущественно в осевую зону при некотором его перемещении в зону рудного гребня. Уменьшение доли железорудного сырья в совокупности масс железорудного сырья и кокса, поступающего со станций углового положения лотка № 9-11 от 100 до 69% при росте данного соотношения в зоне рудного гребня от 58,1 до 58,9 %, приводит к сдвигу части коксовой колоши увеличенной крупности преимущественно в зону рудного гребня. Применение более крупного кокса в условиях изменения уровня засыпи от 1,25 до 2,46 м ведёт к вытеснению его преимущественно в центр при некотором перемещении в пристеночную область колошниковой части доменной печи. **Практическая значимость.** Полученные уравнения могут быть использованы для корректировки режимов загрузки шихтовых материалов по кольцевым зонам колошниковой части доменной печи при изменении эквивалентной крупности кокса и оперативной оценки распределения компонентов шихты на колошнике, что позволит повысить эффективность доменной плавки.

**Ключевые слова:** доменная печь, эквивалентная по поверхности крупность кокса, железорудное сырьё, рациональное распределение шихты, математическое моделирование

© Харченко А.С., Павлов А.В., Юдина С.В., Сибгатуллин С.К., Свечникова Н.Ю., Юдин Д.В., 2025

#### Для цитирования

Математическое моделирование влияния эквивалентной крупности кокса на изменение температурного режима по радиальным зонам доменной печи для различных параметров загрузки и дутья / Харченко А.С., Павлов А.В., Юдина С.В., Сибгатуллин С.К., Свечникова Н.Ю., Юдин Д.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 41-49. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-41-49>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# MATHEMATICAL MODELING OF THE INFLUENCE OF EQUIVALENT COKE SIZE ON THE CHANGE IN TEMPERATURE CONDITIONS IN RADIAL ZONES OF A BLAST FURNACE FOR VARIOUS LOADING AND BLASTING PARAMETERS

Kharchenko A.S.<sup>1</sup>, Pavlov A.V.<sup>2</sup>, Yudina S.V.<sup>1</sup>, Sibagatullin S.K.<sup>1</sup>, Svechnikova N.Yu.<sup>1</sup>, Yudin D.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

<sup>2</sup> Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** For the operation of a blast furnace with low specific coke consumption and high productivity, an important condition is the uniform distribution of the charge components in its blast furnace throat. Rational distribution of the charge and gases should ensure high efficiency of the reduction and thermal processes, as well as smooth discharge of the charge without hanging. **Objectives.** By means of mathematical modeling, evaluate the influence of the loading mode parameters and the distribution of the charge components along the radius of the furnace top on the gas temperatures in the peripheral, axial zones of the furnace top and the ore crest. Derive statistical dependencies of the temperature ratio between the periphery, ore crest and axial zone of the furnace top on the loading parameters and blast characteristics when changing the equivalent coke size. **Result.** According to the results of the study, the increase in coke size in furnaces with a chute loading device was accompanied by spontaneous redistribution of coke, which depended on the blast characteristics and loading parameters, including the initial mode of loading the charge components into the blast furnace. In this regard, statistical dependencies were derived for the ratio of temperatures between the periphery, ore ridge and axial zone of the blast furnace on the loading parameters and blast characteristics. As a result of mathematical modeling, it was established that with a share of the iron ore part of the charge to the mass of iron ore raw materials (IOR) and coke entering the blast furnace from the angular position stations of chute No. 9-11, 6-8 and 3-5, within the limits equal to 100, respectively; 43.7-47.1 and 42.6% at constant backfill level, ore load, equivalent size of agglomerate and pellets, their share, hot blast pressure and blast furnace gas, spontaneous redistribution of coke with an increase in its equivalent size was directed mainly to the axial zone with some of it flowing into the ore ridge zone. A decrease in the share of iron ore raw materials to the mass of iron ore raw materials and coke coming from the angular position stations of chute No. 9-11 from 100 to 69% with an increase in this ratio in the ore ridge zone from 58.1 to 58.9% ensured a preferential flow of coke from an increase in its size mainly into the ore ridge zone. An increase in the equivalent coke size under conditions of a lower fill level from 1.25 to 2.46 m was accompanied by its flow predominantly to the center with some movement to the wall region of the furnace throat. **Practical Relevance.** The obtained equations can be used to adjust the modes of loading of charge materials in the annular zones of the blast furnace throat when changing the equivalent coke size and operational assessment of the distribution of charge components in the throat, which will allow a justified choice of rational parameters for the modes of loading charge into the blast furnace.

**Keywords:** blast furnace, equivalent coke surface size, iron ore raw materials, rational distribution of charge, mathematical modeling

## For citation

Kharchenko A.S., Pavlov A.V., Yudina S.V., Sibagatullin S.K., Svechnikova N.Yu., Yudin D.V. Mathematical Modeling of the Influence of Equivalent Coke Size on the Change in Temperature Conditions in Radial Zones of a Blast Furnace for Various Loading and Blasting Parameters. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 41-49. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-41-49>

## Введение

Технико-экономические показатели работы доменной печи в значительной степени зависят от характеристик кокса, в том числе от его холодной и горячей прочности [1-6], гранулометрического состава [7, 8]. Оптимизация их уровня действует в направлении увеличения линейного размера и объема межкусковых каналов в коксовой насадке горна печи, что оказывает положительное действие на фильтрующую ее способность. В частности, в работе [9] увеличение эквивалентной по поверхности крупности от 52,7 до 54,9 мм улучшало процесс фильтрации жидких продуктов плавки через слой кокса по показателям «DMI» (увеличился в среднем на 1,53 отн. %) и «сте-

пень приближения фактического содержания углерода в чугуне к равновесной величине» (уменьшился в среднем на 0,09 отн. %), что снижало удельный расход кокса в среднем на 2,0 кг/т чугуна. Вместе с тем рост средней эквивалентной крупности кокса сопровождался самопроизвольным его перераспределением в направлении осевой и пристеночной зон печей, оснащенных конусным [9] и лотковым [10] загрузочными устройствами.

Нерациональное распределение рудной нагрузки и, следовательно, газового потока по радиусу колошника [11-13] снизило их производительность в исследованиях в среднем на 0,95 отн. % на каждый процент увеличения эквивалентной крупности кокса [9, 10]. В связи с этим

для эффективной работы доменной печи в условиях изменения крупности кокса целесообразно корректировать режим загрузки. В частности, воздействием на параметры загрузки реализовали преимущество железорудного сырья (ЖРС) эквивалентной крупностью 11,7 мм по сравнению с 11,4 мм [14].

На печах с лотковым загрузочным устройством самопроизвольное перераспределение шихтовых материалов по радиусу колошника при изменении их крупности зависит от различных параметров загрузки и характеристик дутья, в том числе матрицы, уровня засыпи, рудной нагрузки, давления колошникового газа и др. [15-17]. Использование цифровых технологий [18] позволяет эффективно совершенствовать процесс производства чугуна в доменных печах. В частности, целесообразно математическим моделированием вывести статистические зависимости соотношения температур между периферией, рудным гребнем и осевой зоной колошника от параметров загрузки и характеристик дутья с целью корректировки рудной нагрузки по радиусу колошника при изменении эквивалентной крупности кокса.

## Материалы и методы исследования

Для получения статистических зависимостей температуры газа в осевой и периферийной зонах, а также рудном гребне от изменения эквивалентной крупности кокса обработали производственные данные работы доменной печи, оснащенной лотковым загрузочным устройством в программном комплексе STATISTICA. Объем выборки составил  $N = 336$ .

В качестве входных параметров модели использовали: эквивалентную по поверхности крупность железорудного сырья и кокса; содержание окатышей от железорудной части шихты; фактический уровень засыпи; содержание железорудного материала в шихте по станциям углового положения лотка; давление горячего дутья; давление колошникового газа. Характеристики загрузки, параметров дутья и среднее значение для всей выборки представлены в табл. 1.

В качестве выходных параметров использовали температуру в осевой зоне печи ( $T_{\text{ц}}$ ), соотношения температур в осевой зоне к рудному гребню ( $T_{\text{ц}}/T_{\text{гр}}$ ) и в периферийной зоне к осевой ( $T_{\text{пер}}/T_{\text{ц}}$ ).

Таблица 1. Характеристики загрузки и дутьевых параметров в исследуемый период

Table 1. Characteristics of loading and blast parameters during the study period

Наименование показателей	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее значение для всей выборки
Фактический уровень засыпи, м	1,25	2,46	1,67
Рудная нагрузка, т/т	3,72	4,04	3,89
Доля окатышей от железорудной части шихты	0,25	0,43	0,35
Эквивалентная по поверхности крупность, мм:			
– кокса	50,10	57,67	53,16
– агломерата	9,94	10,67	10,36
– окатышей	12,68	14,40	13,66
Содержание железорудного материала в шихте по станциям углового положения лотка, %:			
– № 3-5	38,83	43,0	41,69
– № 6-8	43,75	58,9	49,63
– № 9-11	59,70	100,0	87,31
Давление горячего дутья, ати	2,56	2,76	2,67
Давление колошникового газа, ати	1,37	1,43	1,38

Полученные зависимости температуры газа по радиусу и их соотношений для различных зон по радиусу колошника от параметров загрузки и характеристик дутья представлены следующими уравнениями:

– температура в осевой зоне печи газа по радиусу ( $R^2=0,85$ )

$$T_{\text{ц}} = 2,56 + 30,35 \cdot U_3^3 + 525,63 \cdot OK^3 - 13,09 \cdot 10^{-2} \cdot PH^3 - 17,58 \cdot P_{\text{ГД}}^3 + 5,19 \cdot 10^{-2} \cdot (P_{\text{ГД}} \cdot \text{Пер}^2) - 129,85 \cdot P_{\text{КГ}}^3 + \text{ЭквК} \cdot 10^{-3} \times \\ \times [3,60 \cdot \text{ЭквК}^2 - 1,53 \cdot \text{Пер}^2 - 6,74 \cdot \text{Гр}^2] + \text{Пер} \cdot [1,70 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Пер}^2 - 1,64 \cdot \text{ЭквОК} + 0,42 \cdot U_3^2 + 0,82 \cdot PH^2 + 0,64 \cdot \text{ЭквАГЛ}] + \\ + \text{Гр} \cdot [3,37 \cdot PH^2 - 1,01 \cdot 10^{-3} \cdot U_3^2 - 0,81 \cdot \text{ЭквАГЛ} + 4,22 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Гр}^2 - 2,26 \cdot \text{ЭквОК}] - \text{Пром} \cdot [4,17 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Пром}^2 + 2,58 \cdot U_3^2 + 3,51 \cdot PH^2]; \quad (1)$$

– соотношение температуры газа в центральной части печи к температуре газа в зоне рудного гребня ( $R^2=0,84$ )

$$\frac{T_{\text{ц}}}{T_{\text{гр}}} = 4,28 + 0,31 \cdot U_3^3 + 8,47 \cdot OK^3 - 0,31 \cdot PH^3 + 3,70 \cdot 10^{-2} \cdot P_{\text{ГД}}^3 - 1,96 \cdot P_{\text{КГ}}^3 + \\ + \text{ЭквК} \cdot 10^{-4} \cdot [4,29 \cdot \text{Пром}^2 - 0,45 \cdot \text{Гр}^2 - 0,74 \cdot \text{ЭквК}^2] + \text{Пер} \cdot 10^{-2} \cdot [1,26 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Пер}^2 - 3,52 \cdot \text{ЭквОК} + 1,22 \cdot U_3^2 + 0,73 \cdot PH^2] + \\ + \text{Гр} \cdot 10^{-2} \cdot [2,16 \cdot \text{ЭквАГЛ} + 0,60 \cdot U_3^2 + 4,30 \cdot PH^2 - 2,14 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Гр}^2 - 4,58 \cdot \text{ЭквОК}] + \\ + \text{Пром} \cdot [0,13 \cdot \text{ЭквОК} - 5,12 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Пром}^2 - 0,02 \cdot \text{ЭквАГЛ} - 6,25 \cdot 10^{-2} \cdot U_3^2 - 2,30 \cdot 10^{-2} \cdot PH^2]; \quad (2)$$

– соотношение температуры газа на периферии к температуре в осевой зоне печи ( $R^2=0,78$ )

$$\frac{T_{\text{пер}}}{T_{\text{ц}}} = 1,28 - 1,51 \cdot \text{УЗ}^3 - 1,51 \cdot \text{ОК}^3 + 2,84 \cdot 10^{-2} \cdot \text{РН}^3 - 1,53 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Р}_{\text{ГД}}^3 + 0,33 \cdot \text{Р}_{\text{КГ}}^3 + \text{ЭквК} \cdot 10^{-6} \cdot [1,34 \cdot \text{Пер}^2 + 4,50 \cdot \text{Гр}^2 + 3,84 \cdot \text{ЭквК}^2] +$$

$$+ \text{Пер} \cdot 10^{-3} \cdot [9,65 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Пер}^2 - 1,28 \cdot \text{ЭквОК} - 0,25 \cdot \text{УЗ}^2 + 2,24 \cdot \text{РН}^2 - 3,59 \cdot \text{ЭквАгл}] +$$

$$+ \text{Гр} \cdot 10^{-3} \cdot [3,93 \cdot \text{УЗ}^2 - 5,09 \cdot \text{ЭквАгл} + 0,40 \cdot \text{РН}^2 + 7,41 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Гр}^2 - 2,41 \cdot \text{ЭквОК}] +$$

$$+ \text{Пром} \cdot 10^{-2} \cdot [1,02 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Пром}^2 - 1,11 \cdot \text{ЭквАгл} - 0,23 \cdot \text{УЗ}^2 - 0,93 \cdot 10^{-3} \cdot \text{РН}^2],$$

где  $T_{\text{ц}}$  – температура газа по радиусу в центре печи, °С;  $T_{\text{гр}}$  – температура газа по радиусу в рудном гребне, °С;  $T_{\text{пер}}$  – температура газа по радиусу на периферии, °С; УЗ – фактический уровень засыпи, м; ОК – содержание окатышей в железорудной части шихты, %; РН – рудная нагрузка, т/т;  $\text{Р}_{\text{ГД}}$  – давление горячего дутья, ати;  $\text{Р}_{\text{КГ}}$  – давление колошникового газа, ати; ЭквК – эквивалентная по поверхности крупность кокса, мм; ЭквОК – эквивалентная по поверхности крупность окатышей, мм; ЭквАгл – эквивалентная по поверхности крупность агломерата, мм; Пром – содержание железорудного материала в шихте по станциям углового положения лотка, № 3-5, %; Гр – содержание железорудного материала в шихте по станциям углового положения лотка № 6-8, %; Пер – содержание железорудного материала в шихте по станциям углового положения лотка № 9-11, %.

Регрессионный анализ нелинейной модели уравнений (1)-(3) приведен в **табл. 2**.

Таблица 2. Регрессионный анализ нелинейной модели уравнений (1)-(3)

Table 2. Regression analysis of the nonlinear model of equations (1)-(3)

Параметры модели	$t$ – критерий Стьюдента	$p$ – уровень	Стандартная ошибка	$t$ – критерий Стьюдента	$p$ – уровень	Стандартная ошибка	$t$ – критерий Стьюдента	$p$ – уровень	Стандартная ошибка
Номер уравнения	(1)			(2)			(3)		
$b_0$	0,0122	0,990250	209,2375	1,8879	0,059969	2,265243	<b>2,72427</b>	<b>0,006806</b>	<b>0,470677</b>
УЗ <sup>3</sup>	<b>5,0638</b>	<b>0,000001</b>	<b>5,9924</b>	<b>4,6940</b>	<b>0,000004</b>	<b>0,066913</b>	-1,13194	0,258525	0,013317
ОК <sup>3</sup>	<b>3,1377</b>	<b>0,001865</b>	<b>167,5196</b>	<b>4,5543</b>	<b>0,000008</b>	<b>1,860140</b>	<b>-4,04040</b>	<b>0,000067</b>	<b>0,374055</b>
РН <sup>3</sup>	-1,1546	0,249140	11,3356	<b>-2,4602</b>	<b>0,014424</b>	<b>0,124807</b>	1,17610	0,240450	0,024154
ЭквК <sup>3</sup>	1,3715	0,171214	0,0026	<b>-2,5662</b>	<b>0,010747</b>	<b>0,000029</b>	-0,67833	0,498065	0,000006
ЭквК·Пер <sup>2</sup>	-1,2811	0,201093	0,0012	-	-	-	-	-	-
ЭквК·Гр <sup>2</sup>	-1,2396	0,216065	0,0054	-1,4761	0,140931	0,000031	0,37812	0,705600	0,000012
ЭквК·Пром <sup>2</sup>	-	-	-	<b>3,5708</b>	<b>0,000412</b>	<b>0,000120</b>	<b>3,02255</b>	<b>0,002714</b>	<b>0,000425</b>
ЭквОК·Пер	<b>-2,0383</b>	<b>0,042362</b>	<b>0,8054</b>	<b>-4,1401</b>	<b>0,000045</b>	<b>0,008506</b>	-1,94715	0,052411	0,004783
ЭквОК·Гр	-1,4994	0,134779	1,5091	<b>-2,7818</b>	<b>0,005734</b>	<b>0,016454</b>	<b>-2,92660</b>	<b>0,003678</b>	<b>0,000824</b>
ЭквОК·Пром	1,9301	0,054501	3,3872	<b>3,5862</b>	<b>0,000389</b>	<b>0,036261</b>	-1,55521	0,120907	0,002310
ЭквАгл·Пер	1,7814	0,075817	0,3582	-	-	-	-	-	-
ЭквАгл·Гр	-1,8004	0,072770	0,4491	1,6560	0,098728	0,013066	-1,09741	0,273304	0,004635
ЭквАгл·Пром	-	-	-	-1,1150	0,265718	0,018022	1,11713	0,264795	0,009953
УЗ <sup>2</sup> ·Пер	0,7163	0,474317	0,5887	1,8193	0,069818	0,006716	-0,17344	0,862421	0,001440
УЗ <sup>2</sup> ·Гр	-0,8953	0,371304	1,1316	0,4472	0,655050	0,013372	1,38190	0,167988	0,002845
УЗ <sup>2</sup> ·Пром	-1,0187	0,309117	2,5277	<b>-2,1337</b>	<b>0,033643</b>	<b>0,029301</b>	-0,37213	0,710050	0,006249
РН <sup>2</sup> ·Пер	1,5888	0,113128	0,5165	1,3021	0,193852	0,005641	<b>2,02634</b>	<b>0,043578</b>	<b>0,001104</b>
РН <sup>2</sup> ·Гр	<b>2,6144</b>	<b>0,009373</b>	<b>1,2904</b>	<b>3,0068</b>	<b>0,002854</b>	<b>0,014285</b>	0,14935	0,881371	0,002688
РН <sup>2</sup> ·Пром	-1,6142	0,107501	2,1753	-0,9624	0,336576	0,023943	0,52166	0,602275	0,000003
Пер <sup>3</sup>	-0,3049	0,760609	0,0006	<b>2,9238</b>	<b>0,003710</b>	<b>0,000004</b>	-0,89088	0,373678	0,000001
Гр <sup>3</sup>	1,0820	0,280096	0,0039	-0,5900	0,555600	0,000036	0,86214	0,389268	0,000009
Пром <sup>3</sup>	-0,6063	0,544748	0,0069	<b>-4,5636</b>	<b>0,000007</b>	<b>0,000112</b>	-0,06809	0,945761	0,000015
$\text{Р}_{\text{ГД}}^3$	<b>-2,3474</b>	<b>0,019531</b>	<b>7,4891</b>	1,1714	0,242312	0,031539	<b>-2,41463</b>	<b>0,016324</b>	<b>0,006323</b>
$\text{Р}_{\text{КГ}}^3$	<b>-10,0408</b>	<b>0,000000</b>	<b>12,9325</b>	<b>-13,6723</b>	<b>0,000000</b>	<b>0,143584</b>	<b>11,39098</b>	<b>0,000000</b>	<b>0,028707</b>
$\text{Р}_{\text{ГД}} \cdot \text{Пер}^2$	<b>2,8278</b>	<b>0,004990</b>	<b>0,0183</b>	-	-	-	-	-	-

Решение системы уравнений (1)-(3) даёт температуру газа на периферии колошника и в зоне рудного гребня доменных печей с лотковым загрузочным устройством.

Использование вычисленных значений температур позволяет определить искомые соотношения для входных характеристик загрузки и дутья в заданных пределах.

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{\text{ц}} = \text{уравнение (1)} \\ \frac{T_{\text{ц}}}{T_{\text{гр}}} = \text{уравнение (2)} \\ \frac{T_{\text{пер}}}{T_{\text{ц}}} = \text{уравнение (3)} \end{array} \right. \quad (4)$$

$$T_{\text{гр}} = \frac{T_{\text{ц}}}{\frac{T_{\text{ц}}}{T_{\text{гр}}}}$$

$$T_{\text{пер}} = T_{\text{ц}} \cdot \frac{T_{\text{пер}}}{T_{\text{ц}}}$$



Используя систему уравнений (4), оценили изменение соотношений температур газа по радиусу колошника при увеличении крупности кокса в интервале от 50,0 до 57,5 мм для условий работы печи с различными матрицами загрузки и уровнем засыпи. Оценили мероприятия, позволяющие компенсировать самопроизвольное перераспределение кокса в пространстве колошника.

### Полученные результаты и их обсуждение

**Перераспределение кокса при различной матрице загрузки.** В результате математического моделирования установили, что при доле железорудной части шихты к массе железорудного сырья и кокса, поступающей в колошниковое пространство печи со станций углового положения лотка № 9-11, 6-8 и 3-5, в пределах соответственно 100, 43,7-47,1 и 42,6% при постоянных параметрах загрузки и дутья, равных среднему значению для всей выборки (см. табл. 1), увеличение эквивалентной по поверхности крупности кокса от 50,0 до 57,5 мм сопровождалось самопроизвольным перераспределением кокса преимущественно в осевую зону печи при некотором перетекании его в зону рудного гребня.

В условиях использования матрицы загрузки, обеспечивающей долю железорудной части шихты к массе железорудного сырья и кокса, поступающей в колошниковое пространство печи со станций углового положения лотка № 9-11, 6-8 и 3-5, равных соответственно 100, 47,1 и 42,6%, изменение соотношений температур газа по радиусу колошника было следующим (рис. 1):

- увеличение соотношения температуры газа в центральной части печи к температуре газа в зоне рудного гребня на 11,9 отн. %;

- уменьшение соотношения температуры газа на периферии к температуре в осевой зоне печи на 13,1 отн. %;

- уменьшение соотношения температуры газа на периферии к температуре газа в зоне рудного гребня на 1,7 отн. %.

Согласно моделированию, компенсирование изменения рудной нагрузки в колошниковом пространстве печи из-за самопроизвольного перераспределения кокса по радиусу колошника обеспечивается использованием одного из мероприятий:

- уменьшением доли железорудного сырья к массе железорудного сырья и кокса, поступающих со станций углового положения лотка № 9-11 от 100 до 70% при увеличении доли железорудного сырья к массе железорудного сырья и кокса в зоне рудного гребня и промежуточной зоне печи соответственно от 47,1 до 58,9% и от 42,6 до 43,0%;

- уменьшением доли окатышей от железорудной части шихты от 0,39 до 0,29.

Использование матриц загрузки шихтовых материалов в доменную печь, обеспечивающих поступление шихты со станций углового положения лотка № 9-11 с

соотношением масс железорудного сырья и кокса менее 100%, при массовой доле рудной и коксовой частей шихты, поступающих со станций № 6-8 и 3-5 соответственно в интервалах 58,1-58,9 и 38,8-42,6%, при постоянных параметрах загрузки и дутья, равных среднему значению для всей выборки (см. табл. 1), сопровождалось перемещением кокса от увеличения его крупности преимущественно в зону рудного гребня при некотором перетекании в осевую часть печи.

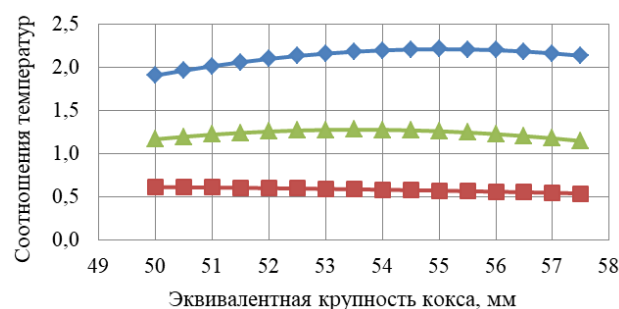


Рис. 1. Влияние эквивалентной по поверхности крупности кокса на соотношения температур газа по радиусу при доле железорудной части шихты к массе железорудного сырья и кокса, поступающей в колошниковое пространство печи со станций углового положения лотка № 9-11, 6-8 и 3-5, равной соответственно 100, 47,1 и 42,6%:  $\blacklozenge T_{ц}/T_{гр}$ ;  $\blacksquare T_{пер}/T_{ц}$ ;  $\blacktriangle T_{пер}/T_{гр}$

Fig. 1. Influence of coke size equivalent on the surface on the ratio of gas temperatures along the radius with the share of the iron ore part of the charge to the mass of iron ore and coke entering the furnace top space from stations of the angular position of tray No. 9-11, 6-8 and 3-5, equal to 100, respectively; 47.1 and 42.6%:  $\blacklozenge T_{c}/T_{gr}$ ;  $\blacksquare T_{per}/T_{c}$ ;  $\blacktriangle T_{per}/T_{gr}$

Для условий использования матрицы загрузки, обеспечивающей долю железорудной части шихты к суммарной массе железорудного сырья и кокса, поступающих в колошниковое пространство печи со станций углового положения лотка № 9-11, 6-8 и 3-5, равных соответственно 68,9, 58,1 и 42,6%, увеличение эквивалентной крупности кокса от 50 до 57,5 мм обеспечивало уменьшение соотношений температур газа по радиусу колошника в следующих зонах (рис. 2):

- в центральной части печи к зоне рудного гребня на 8,9 отн. %;

- на периферии к осевой зоне печи на 12,5 отн. %;

- на периферии к зоне рудного гребня на 19,8 отн. %.

Согласно моделированию, изменение рудной нагрузки в колошниковом пространстве печи из-за самопроизвольного перераспределения кокса по радиусу колошника компенсировало уменьшение доли железорудного сырья к массе железорудного сырья и кокса, поступающих со станций углового положения лотка № 9-11 от 68,9 до 64,9% при росте доли железорудного сырья к массе железорудного сырья и кокса в зоне рудного гребня от 58,1 до 58,9%.

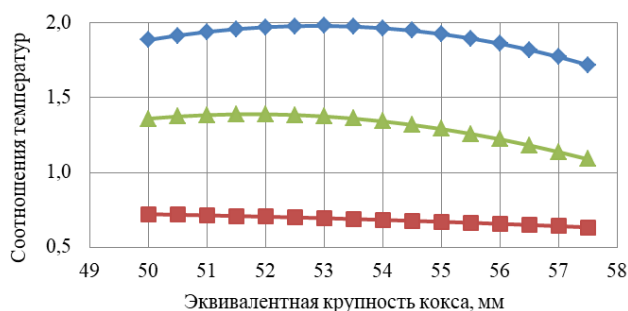


Рис. 2. Влияние эквивалентной по поверхности крупности кокса на соотношения температур газа по радиусу при доле железорудной части шихты к массе железорудного сырья и кокса, поступающей в колошниковое пространство печи со станций углового положения лотка № 9-11, 6-8 и 3-5, равной соответственно 68,9; 58,1 и 42,6%:  $\blacklozenge T_{и}/T_{гр}$ ;  $\blacksquare T_{пер}/T_{и}$ ;  $\blacktriangle T_{пер}/T_{гр}$

Fig. 2. Effect of equivalent coke surface size on the ratio of gas temperatures along the radius with the proportion of the iron ore portion of the charge to the mass of iron ore raw materials and coke entering the furnace top space from the angular position stations of tray No. 9-11, 6-8 and 3-5, equal to 68.9; 58.1 and 42.6%, respectively:  $\blacklozenge T_{и}/T_{гр}$ ;  $\blacksquare T_{пер}/T_{и}$ ;  $\blacktriangle T_{пер}/T_{гр}$

Таким образом, при использовании матриц загрузки шихтовых материалов в доменную печь, обеспечивающих поступление шихты со станций углового положения лотка № 9-11, 6-8 и 3-5 с соотношением масс железорудного сырья и кокса соответственно в интервалах 100, 43,7-47,1 и 42,6%, для компенсации самопроизвольного перераспределения эквивалентной по поверхности крупности кокса в интервале от 50,0 до 57,5 мм при его увеличении на каждый 1 отн. % необходимо уменьшить долю железорудного сырья к массе железорудного сырья и кокса, поступающих со станций углового положения лотка № 9-11 на 30 абс. % при одновременном увеличении доли железорудного сырья к массе железорудного сырья и кокса, поступающих со станций углового положения лотка № 6-8 и 3-5 на 11,8 абс. % и 0,4 абс. % соответственно, либо уменьшить долю окатышей от железорудной части шихты на 25 отн. %.

При применении матриц загрузки шихтовых материалов в доменную печь, обеспечивающих поступление шихты со станций углового положения лотка № 9-11, 6-8 и 3-5 с соотношением масс железорудного сырья и кокса соответственно 59,7-68,9, 58,1-58,9 и 38,8-42,6%, для компенсации самопроизвольного перераспределения эквивалентной по поверхности крупности кокса в интервале от 50,0 до 57,5 мм при его увеличении на каждый 1 отн. % необходимо уменьшить долю железорудного сырья к массе железорудного сырья и кокса, поступающих со станций углового положения лотка № 9-11 на 4,0 абс. % при одновременном увеличении доли железорудного сырья к массе железорудного сы-

рья и кокса, поступающих со станций углового положения лотка № 6-8 на 0,7 абс. %.

**Перераспределение кокса при различном уровне засыпи.** При использовании матрицы загрузки, обеспечивающей загрузку компонентов шихты в колошниковое пространство печи со станций углового положения лотка № 9-11, 6-8 и 3-5, равной соответственно 100, 47,0 и 42,6%, направление перераспределения кокса по радиусу колошника при увеличении его крупности зависело от уровня засыпи. При уровне засыпи в интервале 1,25-2,15 м увеличение эквивалентной крупности кокса сопровождалось самопроизвольным его перераспределением преимущественно в осевую зону печи при некотором перетекании в зону рудного гребня. При загрузке шихты в печь на поверхность засыпи, удаленной от нижней кромки лотка в опущенном состоянии в интервале 2,15-2,46 м, самопроизвольное перераспределение кокса было направлено преимущественно в осевую зону колошника при некотором перемещении его в пристеночную область печи, на что указывает изменение соотношений температур по радиусу колошника.

Для условий уровня засыпи 1,25 м изменение соотношений температур газа по радиусу колошника в зависимости от увеличения крупности кокса от 50 до 57,5 мм было следующим (рис. 3, а):

- увеличение соотношения температуры газа в центральной части печи к температуре газа в зоне рудного гребня на 8,5 отн. %;
- уменьшение соотношения температуры газа на периферии к температуре в центральной части печи на 14,2 отн. %;
- снижение соотношения температуры газа на периферии к температуре газа в зоне рудного гребня 6,6 отн. %.

При работе печи с уровнем засыпи 2,15 м изменение соотношений температур газа по радиусу колошника в зависимости от увеличения крупности кокса от 50 до 57,5 мм было следующим (рис. 3, б):

- увеличение соотношения температур газа в центральной части печи к зоне рудного гребня на 14,1 отн. %;
- уменьшение соотношения температур газа на периферии к осевой зоне печи на 11,1 отн. %;
- увеличение соотношения температур газа на периферии к зоне рудного гребня на 2,8 отн. %.

При использовании других матриц загрузки изменение уровня засыпи не сопровождалось самопроизвольным перераспределением кокса в колошниковом пространстве печи.

Согласно моделированию, компенсирование изменения рудной нагрузки в колошниковом пространстве печи из-за самопроизвольного перераспределения кокса по радиусу колошника для условий уровня засыпи 1,25-2,15 м можно обеспечить уменьшением доли железорудного сырья к массе железорудного сырья и кокса, поступающих со станций углового положения лотка № 9-11 от 100 до 70% при росте доли железорудного сырья к массе железорудного сырья и кокса в зоне рудного гребня от 47 до 58,9%.

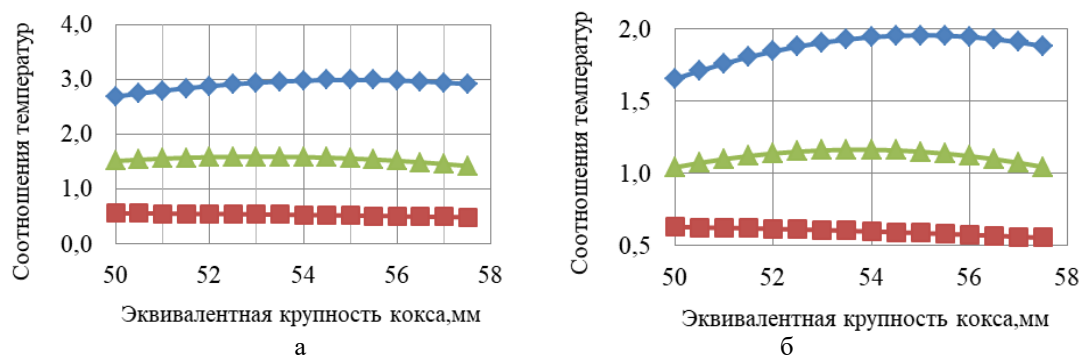


Рис.3. Влияние эквивалентной по поверхности крупности кокса на соотношения температур газа по радиусу при уровне засыпи 1,25 (а) и 2,15 (б):  $\blacklozenge T_c/T_{gr}$ ;  $\blacksquare T_{per}/T_c$ ;  $\blacktriangle T_{per}/T_{gr}$

Fig.3. Effect of equivalent coke surface size on the gas temperature ratios by radius at a filling level of 1.25 (a) and 2.15 (b):  $\blacklozenge T_c/T_{gr}$ ;  $\blacksquare T_{per}/T_c$ ;  $\blacktriangle T_{per}/T_{gr}$

Для условий уровня засыпи в интервале 2,15-2,46 м самопроизвольное перераспределение кокса от его увеличения на 7,5 мм в интервале 50-57,5 мм компенсировало уменьшение доли железорудного сырья к массе железорудного сырья и кокса, поступающих со станций углового положения лотка № 6-8 от 47 до 43,8% и № 3-5 от 42,6 до 40,8%.

Таким образом, при использовании матриц загрузки шихтовых материалов в доменную печь, обеспечивающих поступление шихты со станций углового положения лотка № 9-11, 6-8 и 3-5, равных соответственно 100, 47,0 и 42,6%, и уровне засыпи в интервале 1,25–2,15 м для компенсации самопроизвольного перераспределения эквивалентной по поверхности крупности кокса в интервале от 50,0 до 57,5 мм при его увеличении на каждый 1 отн. %, необходимо уменьшить долю железорудного сырья к массе железорудного сырья и кокса, поступающих со станций углового положения лотка № 9-11 на 40 абс. % при одновременном увеличении доли железорудного сырья к массе железорудного сырья и кокса, поступающих со станций углового положения лотка № 6-8, 3-5 на 15 и 6 абс. % соответственно. Для условий матриц загрузки шихтовых материалов в доменную печь, обеспечивающих поступление шихты со станций углового положения лотка № 9-11, 6-8 и 3-5, равных соответственно 100, 47,0 и 42,6%, и уровня засыпи в интервале 2,15–2,46 м компенсирование самопроизвольного перераспределения эквивалентной по поверхности крупности кокса при его увеличении на каждый 1 отн. % необходимо уменьшить доли железорудного сырья к массе железорудного сырья и кокса, поступающих со станций углового положения лотка № 6-8, 3-5 на 4 и 2 абс. % соответственно.

### Заключение

1. Обработкой производственных данных работы доменной печи, оснащенной лотковым загрузочным устройством, в программном комплексе STATISTICA получили систему уравнений, позволяющих оценить изменение соотношений температур газа по радиусу колошника при увеличении крупности кокса в интервале от 50,0 до 57,5 мм для условий работы печи с различными параметрами загрузки и характеристиками дутья.

2. Математическим моделированием установлено, что направление перераспределения кокса по радиусу колошника при увеличении его крупности зависело от исходных параметров уровня засыпи и матрицы загрузки:

- самопроизвольному перераспределению кокса преимущественно в осевую зону печи при некотором перетекании его в зону рудного гребня способствовало уменьшение доли железорудного сырья, загружаемого на периферию за счет рудной нагрузки в зоне рудного гребня, или работа печи на уровне засыпи в интервале 1,25–2,15 м;

- увеличение доли железорудного сырья, загружаемого в пристеночную зону печи, сопровождалось перемещением кокса от увеличения его крупности преимущественно в зону рудного гребня при некотором перетекании в осевую часть печи;

- при поверхности засыпи, удаленной от нижней кромки лотка в опущенном состоянии в интервале 2,15–2,46 м, самопроизвольное перераспределение кокса было направлено преимущественно в осевую зону колошника при некотором перемещении его в пристеночную область печи.

3. Компенсирующими самопроизвольное перераспределение кокса мероприятиями согласно моделированию может являться изменение матрицы загрузки и доли окатышей в составе шихты.

### Список источников

1. Влияние качества кокса на эффективность доменной плавки в печах разного объема / Д.А. Мучник, А.И. Трикило, В.П. Лялюк [и др.] // Кокс и химия. 2018. № 7. С. 23-29.
2. Дмитриев А.Н. Формирование качества кокса за счет изменения состава угольной шихты для коксования, влияние качества кокса на его расход в доменной плавке и производительность // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 4(1420). С. 40-45.
3. Ганин Д.Р., Фукс А.Ю. Анализ влияния качества кокса на производство чугуна в условиях АО «Уральская сталь» // Черные металлы. 2021. № 2. С. 4-9.

4. Влияние качества кокса на показатели работы доменной печи / И.Ф. Курунов, В.Л. Емельянов, В.Н. Титов, В.В. Какунин // *Металлург*. 2007. № 12. С. 37-39.
5. Анализ влияния горячей прочности кокса (CSR) на показатели работы доменных печей / С.В. Филатов, И.Ф. Курунов, В.Н. Титов, А.М. Логинов // *Сталь*. 2014. № 10. С. 10-14.
6. Оценка качества кокса как компонента технологии доменной плавки / Д.А. Мучник, А.И. Трикило, В.П. Лялюк, Д.А. Кассим // *Кокс и химия*. 2018. № 1. С. 15-21.
7. Формирование гранулометрического состава кокса. Его взаимосвязь с показателями механической прочности / Карунова Е.В., Гюльмалиев А.М., Гагарин С.Г., Султангузин И.А. // *Кокс и химия*. 2006. № 2. С. 23-31.
8. Учет влияния гранулометрического состава кокса на его металлургическую ценность / С.И. Минин, К.В. Миронов, Д.А. Кошкарarov [и др.] // *Кокс и химия*. 2022. № 9. С. 10-14.
9. Влияние крупности кокса на показатели работы доменной печи, оснащенной конусным загрузочным устройством, в условиях ПАО «ММК» / А.С. Харченко, А.В. Павлов, С.В. Юдина, С.К. Сибгатуллин // *Черные металлы*. 2023. № 12. С. 20-24.
10. Влияние эквивалентной крупности кокса на показатели работы доменной печи, оснащенной лотковым загрузочным устройством, в условиях ПАО «ММК» / А.С. Харченко, С.В. Юдина, С.К. Сибгатуллин [и др.] // *Теория и технология металлургического производства*. 2024. № 4(51). С. 4-8.
11. Товаровский И.Г. Анализ критериев оценки распределения шихтовых материалов и газов по радиусу доменной печи // *Черная металлургия. Бюллетень научнотехнической и экономической информации*. 2012. № 12(1356). С. 33-38.
12. Оптимальное распределение сырьевых и топливно-энергетических ресурсов комплекса доменных печей / А.А. Полинов, Н.А. Спирин, И.А. Гурин [и др.] // *Металлург*. 2020. № 3. С. 30-36.
13. Согласованное управление распределением шихтовых материалов на колошнике и газового потока в горне доменной печи / А.К. Тараканов, В.П. Лялюк, Д.А. Кассим [и др.] // *Сталь*. 2018. № 6. С. 2-5.
14. Корректировка режима загрузки сырья в доменную печь при увеличении его эквивалентной крупности / Харченко А.С., Сибгатуллин С.К., Харченко Е.О., Бегинюк В.А. // *Черные металлы*. 2024. № 3. С. 22-27.
15. Харченко А.С. Закономерности поступления компонентов шихты по крупности из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи в зависимости от условий загрузки // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2018. Т. 16, № 3. С. 46-56.
16. Рогожников И.С., Рогожников С.П., Гостенин В.А. Критерии оценки оптимального распределения рудной нагрузки по радиусу доменной печи // *Металлург*. 2020. № 2. С. 23-30.
17. Действие различных факторов на равномерность поступления шихтовых материалов по крупности из бункера БЗУ лоткового типа / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко, В.А. Бегинюк [и др.] // *Теория и технология металлургического производства*. 2016. № 2(19). С. 8-12.
18. Дмитриев А.Н., Золотых М.О., Витькина Г.Ю. Совершенствование доменного производства с использованием цифровых технологий // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2023. Т. 79, № 6. С. 455-464.

## References

1. Muchnik D.A., Trikiло A.I., Lyalyuk V.P. et al. The influence of coke quality on the efficiency of blast furnace smelting in furnaces of different volumes. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry], 2018;(7):23-29. (In Russ.)
2. Dmitriyev A.N. [Formation of coke quality by changing the composition of coal charge for coking, the influence of coke quality on its consumption in blast furnace smelting and productivity]. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchnotekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information], 2018;(4(1420)):40-45. (In Russ.)
3. Ganin D.R., Fuks A.Yu. Analysis of the influence of coke quality on pig iron production under the conditions of Ural Steel JSC. *Chernyye metally* [Ferrous Metals], 2021;(2):4-9. (In Russ.)
4. Kurunov I.F., Yemelyanov V.L., Titov V.N., Kakunin V.V. The influence of coke quality on blast furnace performance.] *Metallurg* [Metallurgist], 2007;(12):37-39. (In Russ.)
5. Filatov S.V., Kurunov I.F., Titov V.N., Loginov A.M. Analysis of the influence of coke hot strength (CSR) on blast furnace performance. *Stal* [Steel], 2014;(10):10-14. (In Russ.)
6. Muchnik D.A., Trikiло A.I., Lyalyuk V.P., Kassim D.A. Assessment of the quality of coke as a component of blast furnace smelting technology. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry], 2018;(1):15-21. (In Russ.)
7. Karunova Ye.V., Gylmaliyev A.M., Gagarin S.G., Sultan-guzin I.A. Formation of granulometric composition of coke. Its interaction with mechanical strength indicators. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry], 2006;(2):23-31. (In Russ.)
8. Minin S.I., Mironov K.V., Koshkarov D.A. et al. Accounting for the influence of coke granulometric composition on its metallurgical value. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry], 2022;(9):10-14. (In Russ.)
9. Kharchenko A.S., Pavlov A.V., Yudina S.V., Sibagatullin S.K. The influence of coke size on the performance of a blast furnace equipped with a conical loading device at PJSC MMK. *Chernyye metally* [Ferrous Metals], 2023;(12):20-24. (In Russ.)
10. Kharchenko A.S., Yudina S.V., Sibagatullin S.K. et al. The effect of equivalent coke size on the performance of a blast furnace equipped with a tray loading device in the conditions of PJSC MMK. *Teoria i technologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [The theory and process engineering of metallurgical production], 2024;(4(51)):4-8. (In Russ.)
11. Tovarovskiy I.G. Analysis of criteria for assessing the distribution of charge materials and gases along the radius of a blast furnace. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchnotekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information], 2012;(12(1356)):33-38. (In Russ.)
12. Polinov A.A., Spirin N.A., Gurin I.A. et al. Optimal distribution of raw materials and fuel and energy resources of the blast furnace complex. *Metallurg* [Metallurgist], 2020;(3):30-36. (In Russ.)



13. Tarakanov A.K., Lyalyuk V.P., Kassim D.A. et al. Coordinated control of the distribution of charge materials on the blast furnace throat and gas flow in the hearth of a blast furnace. *Stal* [Steel], 2018;(6):2-5. (In Russ.)
14. Kharchenko A.S., Sibgatullin S.K., Kharchenko Ye.O., Beginyuk V.A. Adjustment of the raw material loading mode into a blast furnace with an increase in its equivalent size. *Chernyye metally* [Ferrous metals], 2024;(3):22-27. (In Russ.)
15. Kharchenko A.S. Regularities of the flow of charge components by size from the BLT hopper into the furnace throat depending on loading conditions. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018;16(3): 46-56. (In Russ.)
16. Rogozhnikov I.S., Rogozhnikov S.P., Gostenin V.A. Criteria for assessing the optimal distribution of ore load along the radius of a blast furnace. *Metallurg* [Metallurgis], 2020;(2):23-30. (In Russ.)
17. Sibgatullin S.K., Kharchenko A.S., Beginyuk V.A. et al. The effect of various factors on the uniformity of the flow of charge materials by size from the hopper of the chute-type BLT. *Teoria i tehnologia metallurgicheskogo proizvodstva* [The theory and process engineering of metallurgical production], 2016;(2(19)):8-12. (In Russ.)
18. Dmitriyev A.N., Zolotikh M.O., Vitkina G.Yu. Improving blast furnace production using digital technologies. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information], 2023;79(6):455-464. (In Russ.)

Поступила 24.02.2025; принята к публикации 18.03.2025; опубликована 30.06.2025

Submitted 24/02/2025; revised 18/03/2025; published 30/06/2025

**Харченко Александр Сергеевич** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой металлургии и химических технологий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: as.mgtu@mail.ru. ORCID 0000-0002-0454-6399

**Павлов Александр Владимирович** – кандидат технических наук, начальник доменного цеха, Магнитогорский металлургический комбинат, Магнитогорск, Россия.  
Email: pavlov.av@mmk.ru.

**Юдина Светлана Владимировна** – аспирант, старший преподаватель, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: yudinasv1478@mail.ru. ORCID 0000-0001-7505-9005

**Сибгатуллин Салават Камилович** – доктор технических наук, профессор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: 10tks@mail.ru. ORCID 0009-0004-0220-0126

**Свечникова Наталья Юрьевна** – кандидат технических наук, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: natasha-svechnikova@yandex.ru. ORCID 0000-0001-9821-3183

**Юдин Данил Владиславович** – студент магистратуры, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: ydv2002@mail.ru.

**Alexander S. Kharchenko** – DrSc (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: as.mgtu@mail.ru. ORCID 0000-0002-0454-6399

**Alexander V. Pavlov** – Associate Professor, Head of the blast furnace shop, Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia.  
Email: pavlov.av@mmk.ru.

**Svetlana V. Yudina** – Postgraduate Student, Senior lecturer, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: yudinasv1478@mail.ru. ORCID 0000-0001-7505-9005

**Salavat K. Sibgatullin** – DrSc (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: 10tks@mail.ru. ORCID 0009-0004-0220-0126

**Natalia Yu. Svechnikova** – PhD (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: natasha-svechnikova@yandex.ru. ORCID 0000-0001-9821-3183

**Danil V. Yudin** – Master's Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: ydv2002@mail.ru

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 669.295+ 669.296+ 681.5

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-50-60



## ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МАГНИЕТЕРМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ГУБЧАТЫХ ТИТАНА И ЦИРКОНИЯ

Кирин Ю.П.

Березниковский филиал Пермского национального исследовательского политехнического университета,  
Березники, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** В 2021 году в АО «Чепецкий механический завод» освоена магнитоермическая технология получения губчатого циркония. Губчатый цирконий получил широкое применение в атомной энергетике в качестве конструкционного материала для производства ядерного топлива отечественных и зарубежных реакторов. Развитие производства предусматривает повышение конкурентоспособности отечественного губчатого циркония на мировом рынке и обеспечение независимости производства ядерного топлива от зарубежных поставщиков. **Цель работы.** Для повышения конкурентоспособности и снижения импортозависимости в статье предлагается повышение эффективности магнитоермической технологии получения губчатого циркония за счет увеличения производительности оборудования, снижения производственных затрат, улучшения качества готового продукта. **Используемые методы.** Для достижения поставленной цели предлагается использовать опыт совершенствования магнитоермической технологии получения губчатого титана. Проведен анализ магнитоермической технологии получения губчатого титана и направлений повышения ее эффективности. Выделен ключевой технологический передел – процесс вакуум-сепарации, который рассматривается как лимитирующая стадия магнитоермической технологии получения губчатого титана. Его совершенствование выполнено на основе комплекса разработок, обеспечивших интенсификацию вакуум-сепарации, а также совместную интенсификацию процессов восстановления и вакуум-сепарации. В результате внедрения разработок повысилась производительность аппаратов восстановления и вакуум-сепарации, снизились энергозатраты, улучшилось качество губчатого титана. Проведен сравнительный анализ закономерностей процессов вакуум-сепарации губчатых титана и циркония с целью оценки возможности применения ранее выполненных разработок для совершенствования магнитоермической технологии получения губчатого циркония. **Новизна.** Установлены общие закономерности процессов вакуум-сепарации губчатых титана и циркония. **Результат.** На основе общих закономерностей процессов сформулированы общие тенденции развития магнитоермических технологий получения губчатых титана и циркония. **Практическая значимость.** Предложен комплекс разработок магнитоермической технологии получения губчатого титана, применение которого позволит повысить эффективность магнитоермической технологии получения губчатого циркония, что будет способствовать повышению конкурентоспособности отечественного губчатого циркония на мировом рынке и обеспечению независимости производства ядерного топлива от зарубежных поставок.

**Ключевые слова:** магнитоермические технологии, губчатый титан, губчатый цирконий, вакуум-сепарация

© Кирин Ю.П., 2025

### Для цитирования

Кирин Ю.П. Тенденции развития магнитоермических технологий получения губчатых титана и циркония // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 50-60. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-50-60>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF MAGNESIOTHERMAL TECHNOLOGIES FOR PRODUCING TITANIUM AND ZIRCONIUM SPONGE

Kirin Yu.P.

Berezniki branch of Perm National Research Polytechnic University, Berezniki, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** In 2021, Chepetsky Mechanical Plant JSC mastered the magnesiothermal technology for producing sponge zirconium. Sponge zirconium is widely used in the nuclear power industry as a structural material for the production of nuclear fuel for domestic and foreign reactors. The development of production provides for increasing the competitiveness of domestic sponge zirconium in the world market and ensuring the independence of nuclear fuel production from foreign suppliers. **Objectives.** In order to increase competitiveness and reduce import dependence, the article proposes to increase the efficiency of the magnesiothermal technology for producing sponge zirconium by increasing equipment productivity, reducing production costs, and improving the quality of the finished product. **Methods used.** To achieve this goal, it is proposed to use the experience of improving the magnesiothermal technology for producing sponge titanium. An analysis of the magnesiothermal technology for producing sponge titanium and directions for increasing its efficiency was carried out. The key technological stage is identified such as the vacuum separation process, which is considered as the limiting stage of the magnesiothermal technology for producing sponge titanium. Its improvement is based on a set of developments that ensured the intensification of vacuum separation, as well as the combined intensification of the reduction and vacuum separation processes. As a result of the development implementation, the productivity of the reduction and vacuum separation devices increased, energy costs decreased, and the quality of sponge titanium improved. A comparative analysis of the regularities of the processes of vacuum separation of sponge titanium and zirconium was carried out in order to assess the possibility of using previously completed developments to improve the magnesiothermal technology for producing zirconium sponge. **Originality.** General regularities of the processes of vacuum separation of titanium and zirconium sponges were established. **Result.** Based on the general regularities of the processes, general trends in the development of magnesiothermal technologies for producing titanium and zirconium sponge were formulated. **Practical Relevance.** A set of developments of magnesiothermal technology for obtaining sponge titanium is proposed, the use of which will increase the efficiency of magnesiothermal technology for obtaining sponge zirconium, which will contribute to increasing the competitiveness of domestic sponge zirconium on the world market and ensuring the independence of nuclear fuel production from foreign supplies.

**Keywords:** magnesiothermal technologies, sponge titanium, sponge zirconium, vacuum separation

## For citation

Kirin Yu.P. Trends in the Development of Magnesiothermal Technologies for Producing Titanium and Zirconium Sponge. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 50-60. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-50-60>

## Введение

В нашей стране для производства губчатых титана и циркония используются магниетермические технологии, основанные на восстановлении тетрахлоридов металлов магнием. Особенность магниетермической технологии получения губчатого циркония усложняется тем, что тетрахлорид этого металла, в отличие от тетрахлорида титана, представляет собой твердое вещество. Поэтому перед подачей в аппарат восстановления тетрахлорид циркония испаряется в специальном устройстве, после чего пары поступают в зону взаимодействия с магнием. Полученные в результате восстановления тетрахлоридов реакционные массы ( $\text{Ti} + \text{Mg} + \text{MgCl}_2$ ,  $\text{Zr} + \text{Mg} + \text{MgCl}_2$ ) подвергаются вакуум-сепарации для отделения от губчатых металлов основных компонентов реакционных масс – магния и хлорида магния [1-3].

Магниетермическая технология получения губчатого циркония освоена в 2021 году в АО «Чепецкий

механический завод» (г. Глазов, Удмуртская Республика) [3]. Область применения циркония – атомная энергетика, электроника, машиностроение, металлургия [2].

Наиболее широкое применение губчатый цирконий получил в атомной энергетике в качестве конструкционного материала для производства ядерного топлива для отечественных и зарубежных реакторов. Ранее из-за отсутствия собственного производства губчатого циркония ядерное топливо в Российской Федерации получали с использованием импортного губчатого циркония, поставляемого из зарубежных стран-производителей: США, Франции, Китая. Прогнозируется, что произведенный в России губчатый цирконий будет востребован за рубежом. Развитие производства предусматривает повышение конкурентоспособности отечественного губчатого циркония на мировом рынке и обеспечение независимости произ-

водства ядерного топлива от зарубежных поставщиков [4, 5].

Одним из основных направлений повышения конкурентоспособности и снижения импортозависимости может рассматриваться повышение эффективности магниетермической технологии получения губчатого циркония за счет повышения производительности оборудования, снижения производственных затрат, улучшения качества губчатого циркония.

В научно-технической литературе отсутствуют сведения о подходах к решению данной проблемы. Вместе с тем в настоящее время имеется многолетний опыт успешного совершенствования магниетермической технологии получения губчатого титана [6, 7]. Цель статьи – оценка возможности применения данного опыта для совершенствования магниетермической технологии получения губчатого циркония.

Для магниетермического производства губчатого титана актуальна проблема снижения его себестоимости, поскольку он является сырьем для производства металлического титана. В структуре себестоимости губчатого титана наибольшая доля затрат (до 60%) приходится на магниетермические переделы: восстановление титана из его тетраоксида магнием, вакуумную очистку губчатого титана от магния и его хлорида, переработку на товарные партии полученного губчатого титана [8]. Значительное снижение себестоимости и, соответственно, цены губчатого титана возможно лишь за счет существенного усовершенствования и модернизации этих переделов [9], что, в свою очередь, позволит снизить стоимость металлического титана и повысить его конкурентоспособность на внешнем и внутреннем рынках [8, 10, 11].

Среди перечисленных выше технологических переделов вакуум-сепарация реакционной массы является ключевым переделом совершенствования магниетермического производства губчатого титана [1, 6, 7].

Рассмотрим основные закономерности процесса вакуум-сепарации губчатого титана [12–14].

Процесс вакуум-сепарации губчатого титана проводят при температурном и вакуумном режимах 950–1000°C и  $10^{-1}$ – $10^{-3}$  мм рт. ст. При таких условиях магний и его хлорид испаряются из реакционной массы с последующей конденсацией паров в конденсаторе, охлаждаемом водой для поддержания заданного теплового режима конденсации. Магний и хлорид магния испаряются сначала с поверхности реакционной массы, а затем из более глубоких слоев, то есть фронт испарения перемещается в ходе процесса от поверхности реакционной массы в ее центральную часть, в мелкие поры и капилляры губчатого титана. Для удаления летучих компонентов из мелких пор и капилляров губчатого титана требуется длительная высокотемпературная выдержка реакционной массы, что обуславливает низкую производительность и высокую энергоемкость процесса. Повышение скорости отгонки магния и хлорида магния из губчатого титана возможно увеличением температуры выдержки,

ограничиваясь температурой 1050°C стенки реактора из нержавеющей стали 12X18H10T для предотвращения образования эвтектики Ti-Fe. Содержание остаточного хлора в губчатом титане является одним из основных показателей его качества и по окончании процесса не должно превышать 0,08–0,12%. Остаточный хлор содержится в губчатом титане в виде хлорида магния, остающегося в мелких капиллярах и порах губчатого титана. Образующийся в процессе вакуум-сепарации губчатого титана тонкодисперсный конденсат магния и хлорида магния является обратным и используется в следующем процессе восстановления. При демонтаже аппарата после окончания процесса вакуум-сепарации в контакте с воздухом происходит увлажнение и самовозгорание конденсата. В продуктах увлажнения и горения содержится кислород, который, попадая в титановую губку в процессе восстановления, снижает ее качество [15]. Процессы восстановления и вакуум-сепарации взаимосвязаны, поэтому наибольший практический интерес представляет изучение возможности их совместного совершенствования при проведении процесса восстановления с повышенными скоростями подачи тетраоксида титана. Однако такая возможность ограничивается вакуум-сепарацией реакционной массы, поскольку проведение процесса восстановления с повышенными скоростями подачи тетраоксида титана увеличивает пористость губчатого титана, что затрудняет его последующую очистку от хлорида магния в процессе вакуум-сепарации и повышает содержание остаточного хлора. Сказанное выше свидетельствует о лимитирующей роли процесса вакуум-сепарации в повышении технико-экономических показателей магниетермической технологии получения губчатого титана.

Основные направления совершенствования магниетермической технологии губчатого титана состояли в разработке методов сокращения продолжительности и снижения энергозатрат процесса вакуум-сепарации, получения в ходе процесса вакуум-сепарации плотного невозгораемого обратного конденсата магния и хлорида магния с целью снижения содержания в губчатом титане примесей кислорода, сокращения продолжительности процессов восстановления и вакуум-сепарации путем совместного совершенствования технологических режимов этих процессов.

В настоящее время имеется достаточный теоретический и практический материал по совершенствованию процесса вакуум-сепарации губчатого титана, подробно изложенный в монографии [16]. В ней также рассмотрены новые подходы к совместному совершенствованию процессов восстановления и вакуум-сепарации, основанные на исследовании технологий и систем управления процессами и разработанные с использованием методов теории автоматического управления, теории процесса вакуум-сепарации, теории сушки, компьютерного моделирования. Исследова-



ния проводились на промышленных аппаратах восстановления и вакуум-сепарации металлургического цеха филиала «АВИСМА» ПАО «Корпорация ВСПО – АВИСМА». Внедрение разработок существенно улучшило технико-экономические показатели производства губчатого титана: повысилась производительность аппаратов восстановления и вакуум-сепарации, снизились энергозатраты, улучшилось качество губчатого титана. Решение комплекса таких задач связано с интенсификацией магнито-термической технологии получения губчатого титана, предусматривающей рассмотрение вакуум-сепарации как лимитирующей стадии магнито-термической технологии, ее интенсификацию, взаимосвязь процессов вакуум-сепарации и восстановления, совместную интенсификацию этих процессов [6, 7].

В этой связи представлялось целесообразным проанализировать основные закономерности процессов вакуум-сепарации губчатых титана и циркония с целью оценки возможности применения ранее выполненных разработок для совершенствования магнито-термической технологии получения губчатого циркония.

#### **Выделение общих закономерностей процессов вакуум-сепарации губчатых циркония и титана**

Магнито-термическая технология получения губчатого циркония включает три основных передела: восстановление тетрахлорида циркония магнием, вакуумную очистку губчатого циркония от магния и его хлорида, переработку на товарные партии полученного губчатого циркония [2, 3, 17].

Рассмотрим основные закономерности процесса вакуум-сепарации губчатого циркония.

Для отделения продуктов реакции магнито-термического восстановления тетрахлорида циркония применяют вакуум-сепарацию реакционной массы при температуре 920–930°C и остаточном давлении  $10^{-4}$ – $10^{-6}$  мм рт. ст. При таких условиях магний и его хлорид испаряются из реакционной массы с последующей конденсацией паров в конденсаторе, охлаждаемом водой для поддержания заданного теплового режима конденсации. Процесс вакуум-сепарации губчатого циркония включает две основные стадии. На первой стадии происходит испарение с поверхности реакционной массы и крупных пор магния и его хлорида. На второй стадии фронт испарения перемещается вглубь, в поры губчатой структуры, сопровождаясь снижением скорости отгонки. На этой стадии для повышения скорости отгонки магния и хлорида магния из мелких пор и капилляров губчатого циркония и снижения энергозатрат требуется повышение температуры процесса и проведение высокотемпературной выдержки реакционной массы. Однако повышение температуры в процессе вакуум-сепарации губчатого циркония ограничивается температурой стенки реактора из нержавеющей стали 1000°C для предотвращения образования эвтектики Zr-Fe. Структура конденсата магния и хлорида маг-

ния, получаемого в процессе вакуум-сепарации губчатого циркония – тонкодисперсная. Такой конденсат самовозгорается при контакте с окружающим воздухом. Содержание ионов хлора в губчатом цирконии является одним из основных показателей его качества. Остаточный хлор содержится в циркониевой губке в виде хлорида магния, остающегося в мелких открытых капиллярах или закрытых порах губки. Технологические режимы процессов восстановления и вакуум-сепарации взаимосвязаны: при повышении скорости подачи тетрахлорида циркония в аппарат восстановления увеличивается пористость губчатого циркония, вследствие чего затрудняется его очистка от хлорида магния в процессе вакуум-сепарации и повышается содержание остаточного хлора, то есть стадия вакуум-сепарации губчатого циркония ограничивает возможности интенсификации процесса восстановления.

Представленные закономерности вакуум-сепарации губчатого циркония позволяют сделать вывод о ее лимитирующей роли в повышении технико-экономических показателей магнито-термической технологии получения губчатого циркония.

Анализ рассмотренных во введении основных закономерностей вакуум-сепарации губчатого титана и изложенных выше основных закономерностей вакуум-сепарации губчатого циркония показывает, что, несмотря на некоторые различия температурного и вакуумного режимов процессов (920–930°C и  $10^{-4}$ – $10^{-6}$  мм рт. ст., 950–1000°C и  $10^{-1}$ – $10^{-3}$  мм рт. ст.), оба процесса имеют общие закономерности испарения магния и его хлорида из реакционной массы, конденсации паров, формирования конденсата магния и хлорида магния. Общими для данных процессов являются оценка качества губчатых металлов по остаточному содержанию хлора, нахождение остаточного хлора в капиллярах и порах губчатых металлов в виде хлорида магния, а также изменение структур губчатых металлов (увеличение пористости) при повышении скорости подачи тетрахлоридов в процессах восстановления и повышение вследствие этого содержания остаточного хлора в процессах вакуум-сепарации.

#### **Общие направления совершенствования магнито-термических технологий получения губчатых титана и циркония**

Общие закономерности процессов вакуум-сепарации позволяют сформулировать направления совершенствования магнито-термической технологии получения губчатого циркония, аналогичные направлениям совершенствования магнито-термической технологии получения губчатого титана:

- разработка методов сокращения продолжительности и снижения энергозатрат процесса вакуум-сепарации губчатого циркония;
- получение в ходе процесса вакуум-сепарации невозгораемого конденсата магния и хлорида магния;

– сокращение продолжительности процессов восстановления и вакуум-сепарации губчатого циркония путем совместного совершенствования технологических режимов этих процессов.

Таким образом, прослеживаются общие тенденции развития магнитоермических технологий получения губчатых металлов.

Общие закономерности процессов вакуум-сепарации губчатых титана и циркония открывают возможности использования общих направлений совершенствования магнитоермических технологий получения губчатых металлов.

В качестве таких направлений в статье предлагаются практические результаты интенсификации магнитоермической технологии получения губчатого титана, которые могут быть положены в основу повышения эффективности магнитоермической технологии получения губчатого циркония.

Работы проводились по следующим основным направлениям: интенсификация вакуум-сепарации при максимально допустимой температуре процесса; интенсификация вакуум-сепарации реакционной массы при переменном энергоподводе; совместная интенсификация процессов восстановления и вакуум-сепарации губчатого титана [6, 7, 16].

Рассмотрим эти направления более подробно.

*Интенсификация вакуум-сепарации при максимально допустимой температуре процесса.* Данное направление связано с совершенствованием традиционной магнитоермической технологии и основано на существенном повышении скорости вакуум-сепарации губчатого титана при повышении температуры процесса. Это обстоятельство используется для интенсификации вакуум-сепарации путем поддержания максимально допустимой рабочей температуры процесса, обеспечивающей сокращение продолжительности процесса и снижение энергозатрат [1, 18].

Промышленный аппарат вакуум-сепарации губчатого титана включает в себя электропечь с нихромовыми нагревателями и две герметично соединенные между собой реторты: реторту с реакционной массой, нагреваемой в электропечи, и реторту-конденсатор (далее конденсатор), подключенный к вакуумной системе. До начала процесса вакуум-сепарации внутренние объемы указанных реторт разделяет легкоплавкая магниевая заглушка. Температура наружной стенки реторты с реакционной массой поддерживается на заданном уровне при помощи автоматического регулятора изменением подводимой мощности нагревателей электропечи. При нагреве реакционной массы магниевая заглушка проплавляется, и начинается вакуум-сепарация, в процессе которой пары испаряющихся из реакционной массы магния и хлорида магния поступают в конденсатор, где конденсируются на его внутренней стенке [1].

Рассмотрим температурный профиль промышленного аппарата вакуум-сепарации (рис. 1) – изме-

нение температуры наружной стенки реторты с реакционной массой в процессе вакуум-сепарации губчатого титана. Процесс состоит из двух стадий: нагрев реакционной массы с испарением из нее магния и его хлорида и высокотемпературная выдержка для дальнейшего испарения летучих компонентов. Температурный профиль характеризуется следующими параметрами:  $y_n = 850^\circ\text{C}$  – температура испарения магния и его хлорида в момент проплавления магниевой заглушки;  $y_v = 1050^\circ\text{C}$  – максимально допустимая температура выдержки реакционной массы [19].

Интенсификация процесса вакуум-сепарации обеспечивается за счет улучшения качества (точности) управления температурным профилем промышленных аппаратов и повышения за счет этого температуры выдержки реакционной массы. По результатам исследований предложено использовать в системах управления вакуум-сепарацией пропорционально-интегральные регуляторы температуры (ПИ-регуляторы), оптимальные настройки которых позволяют с высокой точностью поддерживать температуру выдержки реакционной массы на уровне  $1050^\circ\text{C}$  [18].

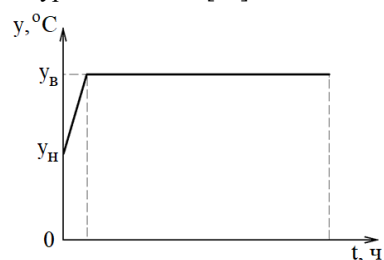


Рис. 1. Температурный профиль промышленного аппарата вакуум-сепарации губчатого титана  
Fig. 1. Temperature profile of an industrial sponge titanium vacuum separation apparatus

Интенсификация вакуум-сепарации осуществлена с помощью системы управления температурным профилем аппарата вакуумной сепарации губчатого титана, представленной на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема системы управления температурным профилем промышленного аппарата вакуум-сепарации губчатого титана  
Fig. 2. Structural diagram of the temperature profile control system of the industrial apparatus for vacuum separation of sponge titanium

Перед началом процесса вакуум-сепарации в ПИ-регуляторе устанавливают максимально допустимое заданное значение температуры  $y_3 = 1050^\circ\text{C}$  наружной стенки реторты с реакционной массой. В ходе процесса температура наружной стенки реторты  $y(t)$  сравнивается с  $y_3$ , рассогласование

$$\varepsilon(t) = y_s - y(t)$$

преобразуется регулятором в регулирующие воздействия  $u(t)$  – изменение мощности нагревателей, обеспечивающих поддержание температуры наружной стенки реторты на стадии высокотемпературной выдержки на уровне 1050°C.

Предложенный подход может быть применен для интенсификации вакуум-сепарации губчатого циркония, для которого, как отмечено выше, для повышения скорости вакуум-сепарации и снижения энергозатрат целесообразно повышение температуры процесса до максимально допустимого значения 1000°C.

Известно, что продолжительность высокотемпературной выдержки реакционной массы может быть сокращена за счет более точного определения момента окончания процесса вакуум-сепарации губчатого титана [1].

В промышленной практике такая задача решается с участием технолога, который из-за отсутствия точного и надежного критерия окончания процессов определяет продолжительность каждого процесса вакуум-сепарации по времени, то есть по истечении заданного времени высокотемпературной выдержки реакционной массы отключает нагреватели аппарата. Такой способ контроля не учитывал индивидуальные особенности протекания вакуум-сепарации в каждом отдельном аппарате, что приводило к снижению производительности процессов и повышению энергозатрат [20].

Для вакуум-сепарации губчатого титана, как эндотермического процесса, энергопотребление (затраты тепла) отражает основные закономерности испарения магния и его хлорида из губчатого титана и используется для более точного определения продолжительности и момента окончания процесса. Установлено, что по характеру изменения потребляемого тепла процесс вакуум-сепарации губчатого титана можно разделить на две стадии: стадию испарения основного количества магния и хлорида из реакционной массы и последующую стадию испарения незначительного количества оставшихся летучих компонентов (около 2% от их общей массы). Кривая изменения потребляемого тепла на первой стадии имеет вид монотонно убывающей функции времени с максимумом в начале сепарации и минимумом на второй стадии процесса на уровне тепловых потерь реторты с реакционной массы. Вторая стадия испарения летучих компонентов протекает при минимальном и практически постоянном потреблении тепла.

Для более точного определения момента окончания процесса вакуум-сепарации губчатого титана разработана автоматизированная система контроля, основанная на определении продолжительности указанных стадий. Ее особенность состоит в том, что изменение потребляемого тепла на испарение магния и хлорида магния из реакционной массы рассматривается как возмущение системы управления темпера-

турным профилем аппарата вакуум-сепарации, что приводит к изменению регулирующих воздействий ПИ-регулятора температуры стенки реторты с реакционной массой. На первой стадии процесса при постепенном снижении потребляемого тепла на испарение летучих компонентов регулирующие воздействия ПИ-регулятора температуры уменьшаются, на второй – при постоянном и минимальном потреблении тепла регулирующие воздействия минимальны и остаются на этом уровне до конца процесса. Таким образом, информация о закономерностях испарения магния и его хлорида из реакционной массы извлекается непосредственно из процесса управления температурным профилем аппарата, что существенно упрощает структуру автоматизированной системы контроля [21].

В процессе вакуум-сепарации губчатого титана условия конденсации паров и структура получаемого конденсата магния и хлорида магния определяются тепловым режимом конденсатора, для управления которым используют охлаждение его наружной стенки водой или воздухом. Интенсивность и продолжительность охлаждения конденсатора назначает технолог, не учитывая при этом изменение его тепловой нагрузки в процессе конденсации паров магния и хлорида магния, вследствие чего при таком тепловом режиме конденсатора происходила объемная конденсация паров и формирование тонкодисперсного конденсата.

В рамках созданной автоматизированной системы контроля процесса вакуум-сепарации губчатого титана разработан алгоритм поддержки принимаемых технологом решений, а также система автоматического управления, позволяющие изменять режимы охлаждения конденсатора (водой или воздухом) в зависимости от изменения его тепловой нагрузки на указанных стадиях процесса. На первой стадии происходит интенсивное испарение из реакционной массы основного количества магния и хлорида магния, и, следовательно, на этой стадии в конденсаторе выделяется максимальное количество тепла с поступающими парами, на второй – при испарении незначительного количества оставшихся летучих компонентов в конденсаторе выделяется минимальное количество тепла. С учетом имеющейся в автоматизированной системе информации о стадиях процесса назначение алгоритма поддержки принятия решений состоит в выдаче технологу сообщений о включении водяного охлаждения конденсатора на первой стадии процесса и о переходе с водяного на воздушное охлаждение конденсатора на второй стадии, что позволило получать плотный невозгораемый конденсат магния и хлорида магния и снизить содержание примесей кислорода в губчатом титане [22, 23].

*Совместная интенсификация процессов восстановления и вакуум-сепарации повышением скорости подачи тетрахлорида титана, повышением температуры вакуум-сепарации.* В магниетермической тех-

нологии получения губчатого титана достаточно хорошо изучены условия интенсификации процесса восстановления тетрахлорида титана магнием. Предложены технологические режимы ведения процесса с повышенными скоростями подачи тетрахлорида титана в аппараты восстановления. В промышленной практике магнитоермического восстановления повышение скорости подачи тетрахлорида титана является основным ресурсом интенсификации процесса. Однако, как уже отмечалось во введении, проведение процесса восстановления с высокими скоростями подачи тетрахлорида титана ухудшает сепарируемость губчатого титана и повышает содержание в нем остаточного хлора. Поэтому вопросы интенсификации процесса восстановления изучают с учетом технологии вакуумной сепарации [12, 13, 16].

Повышение температуры вакуум-сепарации губчатого титана до максимально допустимого значения является одним из ресурсов интенсификации процесса. Поскольку при повышении температуры вакуум-сепарации и улучшении качества ее регулирования существенно возрастает скорость отгонки из реакционной массы магния и хлорида магния, то это обстоятельство, как показывает практика производства губчатого титана, открывает новые возможности интенсификации процесса восстановления.

Совместный подход к интенсификации процессов восстановления и вакуум-сепарации включает следующие основные этапы [7, 16]:

- На первом этапе осуществляется построение математической модели процесса вакуум-сепарации губчатого титана.

- На втором этапе с использованием математической модели разрабатывают систему управления температурным профилем аппаратов вакуумной сепарации. В состав системы управления входят алгоритмы определения момента окончания вакуум-сепарации и поддержки принятия решений в управлении тепловым режимом конденсатора. Основная задача системы управления – интенсификация вакуум-сепарации путем поддержания максимально допустимой температуры и сокращение за счет этого продолжительности процесса и снижения энергозатрат.

- На третьем этапе после внедрения системы управления температурным профилем осуществляется совместная интенсификация процессов восстановления с учетом усовершенствованных технологических режимов вакуум-сепарации. Для этого в производственных условиях экспериментально определяют скорости подачи тетрахлорида титана в аппараты восстановления, обеспечивающие сокращение продолжительности процесса восстановления и требуемое качество губчатого титана по остаточному содержанию хлора.

В качестве критерия интенсификации магнитоермической технологии получения губчатого титана используется производительность аппаратов восста-

новления и вакуум-сепарации, определяемая из соотношения

$$P = \frac{m_{Ti}}{(T_b + T_c)}, \quad (1)$$

где  $P$  – производительность аппаратов восстановления и вакуум-сепарации, кг/ч;  $m_{Ti}$  – масса полученного блока губчатого титана, кг;  $T_b$  – продолжительность процесса восстановления, ч;  $T_c$  – продолжительность процесса вакуум-сепарации, ч.

Результатом интенсификации является повышение производительности аппаратов за счет сокращения продолжительности процессов восстановления и вакуум-сепарации губчатого титана.

*Интенсификация вакуум-сепарации реакционной массы при переменном энергоподводе.* Это направление совершенствования вакуум-сепарации связано с изменением традиционной магнитоермической технологии и основано на учете влияния термодиффузии, обусловленной значительным градиентом температуры, под действием которого в реакционной массе возникает термодиффузионный поток магния и его хлорида, который затрудняет перемещение этих веществ к поверхности реакционной массы. На практике за счет влияния термодиффузии увеличивается продолжительность процесса, и повышаются энергозатраты [16, 19].

Предложено изменить механизм переноса магния и его хлорида путем применения переменных режимов подвода энергии к реакционной массе. Это обеспечивает снижение влияния термодиффузии, выражающееся в уменьшении величины и изменении направления температурного градиента в реакционной массе. На практике переменные режимы подвода энергии реализуют изменением скоростей нагрева и охлаждения реакционной массы на разных стадиях процесса, что способствует выносу зоны испарения магния и его хлорида к ее поверхности и, следовательно, повышению скорости вакуум-сепарации [19, 24, 25].

Некоторые подходы к практической реализации технологии вакуум-сепарации губчатого титана, обеспечивающие сокращение продолжительности процесса и снижение энергозатрат при различных режимах энергоподвода, рассмотрены в работах [19, 26–28].

В качестве примера рассмотрим применение переменного энергоподвода для снижения энергозатрат вакуум-сепарации, доля которых в структуре себестоимости губчатого титана составляет от 15 до 20% [19].

Температурный профиль промышленного аппарата вакуум-сепарации губчатого титана (**рис. 3**) включает три стадии: нагрев реакционной массы с испарением основного количества магния и его хлорида, ее высокотемпературная выдержка для дальнейшего испарения летучих компонентов, последующее охлаждение реакционной массы для испарения оставшегося хлорида магния из мелких пор и капилляров ти-



тановой губки. Снижение влияния термодиффузии обеспечивается за счет уменьшения величины температурного градиента путем снижения скорости нагрева реакционной массы до 9 °C/ч и изменения его направления на стадии высокотемпературной выдержки охлаждением реакционной массы со скоростью 18,6 °C/ч до температуры окончания процесса  $y_k = 750^\circ\text{C}$ .

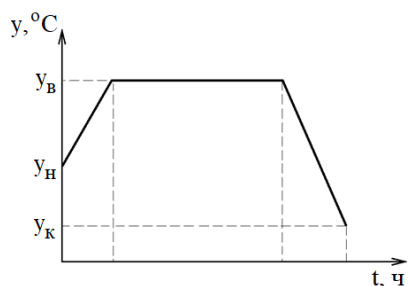


Рис. 3. Температурный профиль промышленного аппарата вакуум-сепарации губчатого титана при переменном энергоподводе

Fig. 3. Temperature profile of an industrial apparatus for vacuum separation of sponge titanium with variable energy supply

Такой температурный профиль реализован с помощью системы программного управления, представленной на рис. 4.



Рис. 4. Структурная схема системы программного управления температурным профилем промышленного аппарата вакуум-сепарации губчатого титана при переменном энергоподводе

Fig. 4. Structural diagram of the software control system for the temperature profile of an industrial apparatus for vacuum separation of sponge titanium with variable energy supply

Здесь  $y_3(t)$  – функция изменения заданного значения температуры профиля аппарата вакуум-сепарации в зависимости от времени процесса (программа управления температурным профилем аппарата), которая состоит из трех участков для указанных стадий процесса.

На стадии нагрева заданное значение температуры профиля  $y_{3n}(t)$  возрастает по линейной зависимости в соответствии с алгоритмом

$$y_{3n}(t) = y_n + k_n \cdot t, \quad (2)$$

где  $k_n = 9^\circ\text{C/ч}$  – коэффициент пропорциональности.

На стадии выдержки заданное значение температурного профиля  $y_{3v} = \text{const}$ . На стадии охлаждения реакционной массы заданное значение температуры

профиля  $y_{3o}(t)$  снижается по линейной зависимости в соответствии с алгоритмом

$$y_{3o}(t) = y_v - k_o \cdot t, \quad (3)$$

где  $k_o = 18,6^\circ\text{C/ч}$  – коэффициент пропорциональности.

Температурный профиль аппарата при переменном энергоподводе отличается от традиционной высокотемпературной технологии вакуум-сепарации (см. рис. 1) и имеет две низкотемпературные стадии, предусматривающие нагрев и охлаждение реакционной массы с заданными скоростями. Такой прием позволил снизить рабочую температуру процесса за счет сокращения продолжительности высокотемпературной выдержки. Следовательно, снизились теплотери промышленного аппарата вакуум-сепарации и, соответственно, энергозатраты процесса [19, 28].

Для получения плотного невозгораемого конденсата магния и хлорида магния в составе системы управления температурным профилем аппарата вакуум-сепарации разработан алгоритм информационной поддержки управления конденсатором, обеспечивающий выдачу технологу сообщений об изменении режима охлаждения конденсатора в зависимости от изменения его тепловой нагрузки на указанных стадиях процесса [29].

*Совместная интенсификация процессов восстановления и вакуум-сепарации повышением скорости подачи тетрахлорида титана, применением переменного энергоподвода к реакционной массе.* В рамках данного направления в качестве ресурса интенсификации процесса восстановления, как и в предыдущем случае, рассматривается повышение скорости подачи тетрахлорида титана. Новым ресурсом интенсификации вакуум-сепарации является применение переменного энергоподвода, обеспечивающего повышение скорости испарения магния и хлорида магния из реакционной массы за счет уменьшения влияния термодиффузии.

Совместная интенсификация процессов восстановления и вакуум-сепарации предусматривает следующие основные этапы [16, 24, 25]:

- На первом этапе анализируют закономерности тепломассопереноса в реакционной массе с выделением термодиффузионного массопотока магния и хлорида магния, снижающего скорость процесса вакуум-сепарации.

- На втором этапе разрабатывают переменные режимы подвода энергии, обеспечивающие снижение влияния термодиффузии уменьшением величины и изменением направления температурного градиента в реакционной массе при ее нагреве и охлаждении с заданными скоростями.

- На третьем этапе разрабатывают систему программного управления температурным профилем аппарата вакуум-сепарации, реализующую режимы

переменного подвода энергии к реакционной массе. В состав системы входит алгоритм информационной поддержки управления конденсатором. Основная задача системы управления – интенсификация вакуум-сепарации при переменном энергоподводе и сокращение за счет этого продолжительности процесса и снижение энергозатрат.

– На четвертом этапе после внедрения системы программного управления температурным профилем аппарата вакуум-сепарации осуществляется в соответствии с рассмотренным выше критерием интенсификации совместная интенсификация процессов восстановления и вакуум-сепарации с учетом усовершенствованных технологических режимов вакуум-сепарации.

### Заключение

Установлены общие тенденции развития магнитермических технологий получения губчатого титана и циркония. Предложен комплекс разработок магнитермической технологии получения губчатого титана, применение которого позволит повысить эффективность магнитермической технологии получения губчатого циркония, что будет способствовать повышению конкурентоспособности отечественного губчатого циркония на мировом рынке и обеспечению независимости производства ядерного топлива от зарубежных поставок.

### Список литературы

1. Тарасов А.В. Металлургия титана. М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. 328 с.
2. Металлургия циркония и гафния / Барышников Н.В., Гегер В.Э., Денисова Н.Д., Казайн А.А., Кожемякин В.А., Нехамкин Л.Г., Родякин В.В., Цылов Ю.А. М.: Металлургия, 1979. 208 с.
3. Магнитермия редких металлов и их сплавов / Дробот Д.В., Мельников Д.Л., Детков П.Г., Нечаев В.Н. Соликамский магниевый завод. Соликамск, 2021. 172 с.
4. Росатом совершил циркониевый прорыв // Независимая газета. URL: [https://www.ng.ru/economics/2021-10-05/100\\_175205102021.html](https://www.ng.ru/economics/2021-10-05/100_175205102021.html) (дата обращения 23.04.2024).
5. Новая технология получения циркония позволит нарастить экспорт ядерного топлива // Страна Росатом. URL: <https://strana-rosatom.ru/2021/10/08/novaya-tehnologiya-polucheniya-cirkoniya/> (дата обращения 23.04.2024).
6. Современные направления совершенствования и развития производства губчатого титана / Киринов Ю.П., Затонский А.В., Беккер В.Ф. и др. // Титан. 2003. № 2(13). С. 11-16.
7. Некоторые результаты совершенствования процесса получения губчатого титана / Ю.П. Киринов, В.Ф. Беккер, А.В. Затонский и др. // Цветные металлы. 2009. №12. С.91-94.
8. Станет ли титан дешевле завтра? О перспективах разработки непрерывной технологии магнитермического производства титана / С.М. Лупинос, С.Б. Грищенко, Д.В. Прутцков и др. // Титан. 2015. №3(49). С.14-21.
9. Листопад Д.А. Усовершенствование магнитермического процесса получения титана губчатого с целью снижения поступления примесей // Технологический аудит и резервы производства. 2012. № 3/1(5). С. 13-14.
10. Петрова Л.Г., Лысак В.В., Малькова Е.В. Оценка состояния титанового рынка в условиях современной геополитической обстановки // Проблемы экспертизы в автомобильно-дорожной отрасли. 2022. №4 (5). С. 18-30.
11. Мастушкин М.Ю., Кусакина Ю.Н. Решение проблемы перехода к новой модели производства высокотехнологичной продукции (на примере сплавов титана) // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. №3(105). С.156-159.
12. Титан / Гармата В.А., Петрунько А.Н., Галицкий Н.В., Олесов Ю.Г., Сандлер Р.А. М.: Металлургия, 1983. 559 с.
13. Химическая технология титана / Резниченко В.А., Устинов В.С., Карязин И.А., Халимов Ф.Б. М.: Наука, 1983. 245 с.
14. Родякин В.В., Гегер В.Э., Скрыпнюк В.М. Магнитермическое производство губчатого титана. М.: Металлургия, 1971. 216 с.
15. Александровский С.В., Титаренко А.И., Черепанова Е.А. Поведение кислорода при производстве губчатого титана. М.: ЦНИИ «Цветмет», 1989. Вып.1. 52 с.
16. Киринов Ю.П., Беккер В.Ф., Затонский А.В. Совместное проектирование технологии и системы управления вакуумной сепарацией губчатого титана: монография / Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 2008. 124 с.
17. Зеликман А.Н., Коршунов Б.Г. Металлургия редких металлов: учебник для вузов по специальности «Металлургия цветных металлов». М.: Металлургия, 1991. 432 с.
18. Киринов Ю.П., Бильфельд Н.В., Тихонов В.А. Робастная настройка ПИ-регулятора температуры процесса вакуумной сепарации губчатого титана // Промышленные АСУ и контроллеры. 2019. №6. С. 3-10. DOI: 10.25791/asu.06.2019.676.
19. Киринов Ю.П., Тихонов В.А., Ангельхер А.Ю. Применение методов теории сушки для исследования и управления тепломассопереносом при вакуумной очистке титановой губки от магния и хлорида магния // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. 2021. №4. С.17-28. DOI: 10.15593/2224-9400/2021.4.02.
20. Критерий окончания процесса вакуумной сепарации губчатого титана / Ю.П. Киринов, А.В. Затонский, В.Ф. Беккер и др. // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 6. С. 6-9.
21. Киринов Ю.П., Краев С.Л. Контроль вакуумной сепарации губчатого титана в АСУТП // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2015. № 2. С. 58-63.
22. Киринов Ю.П., Краев С.Л. Поддержка принятия решений в управлении конденсатором аппарата вакуумной сепарации губчатого титана // Вестник Костромского государственного университета им. Н.А. Некрасова. 2013. № 1. С. 29-32.
23. Киринов Ю.П., Кирьянов В.В. Совершенствование управления конденсатором аппарата вакуумной сепарации губчатого титана // Новый университет. 2015. № 3-4. С. 26-30.
24. Пат. 2070593 Российская Федерация, МПК C22B 34/12. Способ вакуумной сепарации губчатого титана / Ю.П.

- Кири́н; заявитель и патентообладатель Березниковский титано-магнийский комбинат. № 93006574/02; заявл.03.02.1993; опубл. 20.12.1996. Бюл. №35.
25. Пат. 2061774 Российская Федерация, МПК C22B 34/12. Способ вакуумной сепарации губчатого титана / Ю.П. Кири́н; заявитель и патентообладатель АО «АВИСМА – титано-магнийский комбинат». № 93013415/02; заявл.16.03.1993; опубл.10.06.1996. Бюл. № 16.
  26. Совместная разработка технологии и системы управления вакуумной сепарацией губчатого титана / Ю.П. Кири́н, А.В. Затонский, В.Ф. Беккер и др. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2007. № 9. С. 7-10.
  27. Энергосберегающие режимы вакуумной сепарации губчатого титана / С.М. Немчинов, В.А. Тихонов, Ю.П. Кири́н, В.В. Кирьянов // Молодежная наука в развитии регионов: материалы 4-й Всерос. конф. студентов и молодых ученых (Березники, 23 апреля 2014). Пермь: Березниковский филиал Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. С. 213-216.
  28. Кири́н Ю.П., Кирьянов В.В., Тихонов В.А. Низкотемпературная вакуумная сепарация губчатого титана // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 5. С. 227-229.
  29. Кири́н Ю.П., Беккер В.Ф., Затонский А.В. Информационная поддержка управления тепловым режимом конденсатора в производстве губчатого титана // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. № 1(37). С.84-86.
- ### References
1. Tarasov A.V. *Metallurgiya titana* [Metallurgy of titanium]. Moscow: IKC Akademkniga, 2003, 328 p. (In Russ.)
  2. Baryshnikov N.V., Geger V.E., Denisova N.D., Kazain A.A., Kozhemyakin V.A., Nekhamkin L.G., Rodyakin V.V., Tsylov Yu.A. *Metallurgiya tsirkoniya i gafniya* [Metallurgy of zirconium and hafnium]. Moscow: Metallurgiya, 1979, 208 p. (In Russ.)
  3. Drobot D.V., Melnikov D.L., Detkov P.G., Nechaev V.N. *Magnitermiya redkih metallov i ih splavov* [Magnetothermy of rare metals and their alloys]. Solikamsk: Solikamskiy magnievyy zavod, 2021, 172 p. (In Russ.)
  4. Rosatom has made a zirconium breakthrough. *Nezavisimaya gazeta* [Independent Newspaper]. Available: [https://www.ng.ru/economics/2021-10-05/100\\_175205102021.html](https://www.ng.ru/economics/2021-10-05/100_175205102021.html) (Accessed April 23, 2024).
  5. The new zirconium production technology will increase the export of nuclear fuel. Strana Rosatom [A country Rosatom]. Available: <https://strana-rosatom.ru/2021/10/08/novaya-tehnologiya-polucheniya-tsirkoniya/> (Accessed April 23, 2024).
  6. Kirin Yu.P., Zatonkiy A.V., Bekker V.F. et al. Modern directions of improvement and development of sponge titanium production. *Titan* [Titanium], 2003;(2(13)):11-16. (In Russ.)
  7. Kirin Yu.P., Bekker V.F., Zatonkiy A.V. Some results of improving the process of obtaining sponge titanium. *Tsvetnyye metally* [Non-ferrous metals], 2009;(12):91-94. (In Russ.)
  8. Lupinos S.M., Grishchenko S.B., Prutckov D.V. et al. Will titanium become cheaper tomorrow? On the prospects of developing a continuous technology for magneto-thermal titanium production. *Titan* [Titanium], 2015;(3(49)):14-21. (In Russ.)
  9. Listopad D.A. Improvement of the magneto-thermal process for obtaining sponge titanium in order to reduce the intake of impurities. *Tekhnologicheskii audit i rezervy proizvodstva* [Technology audit and production reserves], 2012;(3(1(5))):13-14. (In Russ.)
  10. Petrova L.G., Lysak V.V., Malkova E.V. Assessment of the titanium market in the current geopolitical environment. *Problemy ekspertizy v avtomobilno-dorozhnoy otрасli* [Problems of expertise in the automotive and road industry], 2022;(4(5)):18-30. (In Russ.)
  11. Mastushkin M.Yu., Kusakina Yu.N. Solving the problem of transition to a new model of production of high-tech products (using the example of titanium alloys). *Mezhdunarodniy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Scientific Research Journal], 2021;(3(105)):156-159. (In Russ.)
  12. Garmata V.A., Petrunko A.N., Galitskiy N.V., Olesov Yu.G., Sandler R.A. *Titan* [Titanium]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 559 p. (In Russ.)
  13. Reznichenko V.A., Ustinov V.S., Karyazin I.A., Khalimov F.B. *Khimicheskaya tekhnologiya titana* [Chemical technology of titanium]. Moscow: Nauka, 1983, 245 p. (In Russ.)
  14. Rodyakin V.V., Geger V.E., Skrypnuk V.M. *Magnitermicheskoe proizvodstvo gubchatogo titana* [Magnetothermal production of sponge titanium]. Moscow: Metallurgiya, 1971, 216 p. (In Russ.)
  15. Aleksandroviy S.V., Titarenko A.I., Cherepanova E.A. *Povedenie kisloroda pri proizvodstve gubchatogo titana* [The behavior of oxygen in the production of sponge titanium]. Moscow: Tsvetmet, 1989, Iss.1, 52 p. (In Russ.)
  16. Kirin Yu.P., Bekker V.F., Zatonkiy A.V. *Sovmestnoye proektirovaniye tekhnologii i sistemy upravleniya vakuumnoy separatsiyey gubchatogo titana: monografiya* [Joint design of technology and control system for vacuum separation of sponge titanium: monograph]. Perm: PNRPU, 2008, 124 p. (In Russ.)
  17. Zelikman A.N., Korshunov B.G. *Metallurgiya redkih metallov: uchebnyy dlya vuzov po specialnosti «Metallurgiya tsvetnykh metallov»* [Metallurgy of rare metals: a textbook for universities specializing in Metallurgy of non-ferrous metals]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 432 p. (In Russ.)
  18. Kirin Yu.P., Bifeld N.V., Tikhonov V.A. Robust adjustment of the temperature controller of the sponge titanium vacuum separation process. *Promyshlennyye ASU i kontrolyer* [Industrial automated control systems and controllers], 2019;(6):3-10. (In Russ.) DOI: 10.25791/asu.06.2019.676.
  19. Kirin Yu.P., Tikhonov V.A., Angelher A.Yu. Application of drying theory methods for the study and control of heat and mass transfer during vacuum cleaning of sponge titanium from magnesium and magnesium chloride. *Vestnik PNIPU. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya* [Bulletin of PNRPU. Chemical technology and biotechnology], 2021; (4):17-28. DOI: 10.15593/2224-9400/2021.4.02. (In Russ.)
  20. Kirin Yu.P., Zatonkiy A.V., Bekker V.F. et al. Criteria for the end of the process of vacuum separation of sponge titanium. *Avtomatizatsiya i sovremennyye tekhnologii* [Automation and modern technologies]. 2008;(6):6-9. (In Russ.)
  21. Kirin Yu.P., Kraev S.L. Control of vacuum separation of sponge titanium in automated process control systems. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika* [Devices

- and systems. Management, monitoring, diagnostics], 2015;(2):58-63. (In Russ.)
22. Kirin Yu.P., Kraev S.L. Decision support in the capacitor management of the sponge titanium vacuum separation apparatus. *Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.A. Nekrasova* [Bulletin of Kostroma State University named after N.A. Nekrasov], 2013;(1):29-32. (In Russ.)
  23. Kirin Yu.P., Kiryanov V.V. Improvement of condenser control of the sponge titanium vacuum separation apparatus. *Noviy universitet* [New university], 2015;(3-4):26-30. (In Russ.)
  24. Kirin Yu.P. *Sposob vakuumnoy separatsii gubchatogo titana* [The method of vacuum separation of spongy titanium]. Patent RF, No. 2070593, 1996.
  25. Kirin Yu.P. *Sposob vakuumnoy separatsii gubchatogo titana* [The method of vacuum separation of spongy titanium]. Patent RF, No. 2061774, 1996.
  26. Kirin Yu.P., Zatonskiy A.V., Bekker V.F. et al. Joint development of technology and control system for vacuum separation of sponge titanium. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika* [Devices and systems. Management, monitoring, diagnostics], 2007;(9):7-10. (In Russ.)
  27. Nemchinov S.M., Tihonov V.A., Kirin Yu.P., Kiryanov V.V. Energy-saving modes of vacuum separation of sponge titanium. *Molodezhnaya nauka v razviti regionov: materialy 4-y Vseros. konf. studentov i molodyh uchenykh* [Youth science in the development of regions. Proceedings of the 4<sup>th</sup> All-Russian Conference of Students and Young Scientists]. Perm: Bereznikovskiy branch of Perm National Research Polytechnic University, 2014, pp. 213-216. (In Russ.)
  28. Kirin Yu.P., Kiryanov V.V., Tikhonov V.A. Low-temperature vacuum separation of sponge titanium. *Nauchno tekhnicheskiiy vestnik Povolzhya* [Scientific and Technical Bulletin of the Volga region], 2014;(5):227-229. (In Russ.)
  29. Kirin Yu.P., Bekker V.F., Zatonskiy A.V. Information support for the control of the thermal regime of the condenser in the production of sponge titanium. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University], 2009;(1(37)):84-86. (In Russ.)

Поступила 28.06.2024; принята к публикации 10.02.2025; опубликована 30.06.2025  
Submitted 28/06/2024; revised 10/02/2025; published 30/06/2025

**Ки́рин Ю́рий Петро́вич** – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Березниковский филиал Пермского национального исследовательского политехнического университета, Березники, Россия.  
Email: u.p.kirin@yandex.ru.

**Yuriy P. Kirin** – PhD (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher, Berezniki Branch of Perm National Research Polytechnic University, Berezniki, Russia.  
Email: u.p.kirin@yandex.ru.





ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 669; 66.061.34; 66.065.2

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-61-70

## ПОПУТНОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ФОСФОГИПСА КАРБОНАТНО-ЩЕЛОЧНЫМ МЕТОДОМ

Герасёв С.А., Глазова К.Д., Курочкин И.О., Кузнецов В.В., Литвинова Т.Е.

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** В отвалах на территории России находится по меньшей мере 500 млн т фосфогипса – отхода производства фосфорной кислоты и фосфатных удобрений. В большинстве случаев распространено его хранение открытым способом, следовательно, загрязнение окружающей среды, нарушение естественного ландшафта и потеря ценных компонентов неизбежны. По известным данным, уровень утилизации фосфогипса сегодня составляет приблизительно 1%. Фосфогипс может содержать от 0,1 до 0,9% редкоземельных элементов, что позволяет рассматривать его как доступный вторичный источник этих металлов. **Цель работы.** Повышение комплексности переработки фосфогипса карбонатно-щелочным методом за счет появления дополнительного продукта в виде соединений редкоземельных металлов. **Используемые методы.** Химический состав образцов фосфогипса и продуктивных растворов определен методом атомно-эмиссионной спектроскопии, морфология фосфогипса – методом сканирующей электронной микроскопии, идентификация осадков редкоземельных металлов – методом рентгенофлуоресцентного анализа. **Новизна.** Произведена апробация карбонатно-щелочного метода на образцах фосфогипса различного генеза (образованного из фосфорита и апатита; полученного по дигидратной и полугидратной технологии; отвального и свежеполученного). **Результат.** Определены значения степени конверсии сульфата кальция в карбонат кальция для образцов техногенного фосфогипса (96,4–98,4%); на основании экспериментальных данных рассчитаны степени извлечения редкоземельных металлов в раствор (степень извлечения суммы редкоземельных металлов составила 58,6–68,2%); предложены варианты дальнейшего выделения редкоземельных металлов из раствора выщелачивания за счет осаждения щавелевой или фосфорной кислотой. **Практическая значимость.** Результаты исследований могут быть применены для разработки технологии утилизации фосфогипса карбонатно-щелочным методом.

**Ключевые слова:** фосфогипс, редкоземельные элементы, лантаноиды, карбонатные комплексы, конверсия, выщелачивание

© Герасёв С.А., Глазова К.Д., Курочкин И.О., Кузнецов В.В., Литвинова Т.Е., 2025

### Для цитирования

Попутное извлечение редкоземельных элементов из фосфогипса карбонатно-щелочным методом / С.А. Герасёв, К.Д. Глазова, И.О. Курочкин, В.В. Кузнецов, Т.Е. Литвинова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 61-70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-61-70>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# ASSOCIATED RARE EARTH ELEMENTS EXTRACTION FROM PHOSPHOGYPSUM BY CARBONATE-ALKALINE METHOD

Gerasev S.A., Glazova K.D., Kurochkin I.O., Kuznetsov V.V., Litvinova T.E.

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** At least 500 million tonnes of phosphogypsum (by-product of phosphoric acid and phosphate fertilizer technology) are in Russian dumps. In most cases, it is common to store phosphogypsum by open method, which inevitably leads to environmental pollution, disturbance of the natural landscape and loss of valuable components. According to literary data, the level of phosphogypsum utilization today is approximately 1 %. Phosphogypsum consists of from 0.1 % to 0.9 % of the rare earths, consequently it is an available secondary source of these metals. **Objective** is an increasing of phosphogypsum processing level by carbonate-alkaline method due to obtaining an additional rare earth product. **Methods Applied.** Chemical composition of phosphogypsum samples and productive solutions was determined by ICP analysis, the morphology of phosphogypsum – by SEM, and the rare earth metal sediments identification – by XRF analysis. **Originality.** Carbonate-alkaline method approbation was carried using different originated phosphogypsum samples (formed from phosphorite and apatite; obtained by dihydrate and semi-hydrate technology; dumped and freshly obtained). **Result.** Conversion level of calcium sulphate into calcium carbonate was determined for technogenic phosphogypsum samples and was 96.4–98.4%; based on experimental data obtained degree of rare earth metals extraction into solution was 56.8–68.2% for sum rare earth; variants of further rare earth metals extraction from leaching solution by sedimentation with oxalic or phosphoric acid were proposed. **Practical Relevance.** Scientific results can be applied for development of phosphogypsum utilization technology by carbonate-alkaline method.

**Keywords:** phosphogypsum, rare earth elements, lanthanides, carbonate complexes, conversion, leaching

## For citation

Gerasev S.A., Glazova K.D., Kurochkin I.O., Kuznetsov V.V., Litvinova T.E. Associated Rare Earth Elements Extraction from Phosphogypsum by Carbonate-Alkaline Method. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 61–70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-61-70>

## Введение

К представителям редкоземельных элементов (РЗЭ) относятся лантаноиды, иттрий и скандий [1, 2]. На основании Распоряжения Правительства Российской Федерации от 30.08.2022 № 2473-р эти металлы включены в перечень основных видов стратегического минерального сырья, что указывает на приоритетность развития технологий получения РЗЭ для обеспечения бесперебойной работы оборонного сектора, энергетики и промышленности в целом [3, 4].

Отечественная минерально-сырьевая база РЗЭ располагает относительно большими запасами: примерно 27 млн т (в пересчете на оксиды) – третье место в мире, при этом доля мирового производства составляет не более 0,9 % [5, 6]. К причинам столь низкого уровня производства можно отнести неразвитую инфраструктуру вблизи богатых месторождений (например, самые богатые участки рудного массива Томтор насчитывают 8-9 % РЗЭ в пересчете на оксиды, однако месторождение недоступно [7, 8]), ориентация на импорт редкоземельной продукции из Китая (доля импорта составляет 85-90 %) [9, 10].

Один из способов снижения импортозависимости – вовлечение в производство техногенного сырья, в состав которого входят редкоземельные металлы [11, 12]. Согласно современной классификации РЗЭ, учи-

тывающей соотношение спроса и предложения, их подразделяют на три группы по важности [13, 14]:

- 1) критические (неодим, европий, тербий, диспрозий, иттрий, эрбий);
- 2) некритические (лантан, празеодим, самарий, гадолиний);
- 3) избыточные (церий, гольмий, тулий, иттербий, лютеций).

Переработка апатита и фосфорита в фосфорную кислоту и фосфатные удобрения приводит к образованию крупнотоннажного отхода фосфогипса (ФГ) –  $\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ : при  $n = 0,5$  – полугидрат, при  $n = 2$  – дигидрат [15, 16]. ФГ содержит в качестве примесей от 0,1 до 0,9% критических, некритических и избыточных РЗЭ, таким образом, он представляется перспективным сырьевым источником [17, 18].

В мировой практике исследования в области утилизации ФГ ведутся по трем укрупненным направлениям [19]:

- 1) применение в сельском хозяйстве (известкование почвы) [20, 21];
- 2) применение в строительстве (строительные смеси, дорожные покрытия) [22, 23];
- 3) химическая переработка органическими или неорганическими реагентами (конверсионные методы, термические методы и др.) [24, 25].

Наиболее известным вариантом извлечения РЗЭ из ФГ считается сернокислотный метод, позволяю-

щий очистить гипс от РЗЭ при добавлении к нему  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (концентрация  $\text{H}_2\text{SO}_4$  20–25 %, отношение ж:т = 2–3, температура 80°C). Тем не менее при таком подходе исключена переработка сульфата кальция. Рациональным и экологически безопасным вариантом утилизации ФГ является переработка методом карбонатно-щелочной конверсии, цель которого, прежде всего, превратить основной компонент (сульфат кальция) в коммерчески ценный карбонат кальция по уравнению (1). Осуществить процесс возможно при обработке пульпы ФГ раствором карбоната щелочного металла при температуре 70–90°C [26].



Форма существования РЗЭ в ФГ зависит от природы исходного сырья, способа его переработки и условий хранения (в случае отвального ФГ). Так, среди возможных фаз встречаются фосфаты, фториды и сульфаты РЗЭ, при этом фосфаты обладают меньшей растворимостью в воде и хуже поддаются выщелачиванию [27, 28]. По этой причине ранние исследования были направлены на изучение растворимости синтетических фосфатов РЗЭ в среде карбонат-иона. Установлено, что переход РЗЭ из твердой в жидкую фазу осуществим под действием  $\text{CO}_3^{2-}$  и сопровождается образованием растворимых карбонатных комплексов вида  $\text{Ln}(\text{CO}_3)_n^{3-2n}$  (при  $n = 1; 2$ ). Результаты термодинамического и кинетического анализа системы  $\text{LnPO}_4 - \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$  служат основой для реализации попутного извлечения РЗЭ в раствор при карбонатно-щелочной переработке ФГ в конверсионный мел [29].

Ограничение в применении карбонатно-щелочного метода – присутствие в ФГ соединений тория и урана, которые под действием карбонат-иона, так же как и РЗЭ, способны переходить в раствор, что является актуальным, например, для ФГ, расположенного на Африканском континенте [30–32].

Для последующего выделения РЗЭ из водной фазы традиционно используют экстракционные, сорбционные и осадительные методы, однако большинство из них апробировано только для кислых и нейтральных сред [33–35]. Таким образом, извлечение

РЗЭ из щелочных (карбонатно-щелочных) растворов остается все еще нерешенной задачей.

В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований в области попутного извлечения РЗЭ из отечественного ФГ различного происхождения раствором карбоната калия с получением растворимых карбонатных комплексов. Также рассмотрена возможность их дальнейшего выделения осадительными методами. В качестве осадителей использовали щавелевую кислоту, оксалат натрия и фосфорную кислоту.

### Материалы и методы исследования

Конверсию ФГ проводили раствором карбоната калия в реакторной системе HEL Automate в изотермических условиях при заданной скорости перемешивания. Процесс исследован на 4-х образцах техногенного фосфогипса, производимого следующими компаниями:

1) «ЕвроХим» («Фосфорит», г. Кингисепп) – 1 образец свежеполученного и 1 образец отвального ФГ, образованного по дигидратному методу из фосфоритового концентрата;

2) «ФосАгро» («Апатит», г. Череповец) – 2 образца свежеполученного ФГ, образованного по полу-гидратному и дигидратному методу из апатитового концентрата.

Состав проб ФГ и продуктивных растворов установлен методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на оборудовании ICPE-9000 (Shimadzu). Порошки ФГ предварительно были переведены в форму азотно-кислотной вытяжки, их состав приведен в **табл. 1**. Так, Се, Dy, La, Nd и Y были обнаружены во всех четырех материалах, Er – только в образцах 1 и 2, Yb – в образцах 3 и 4. Содержание РЗЭ в образцах ФГ представлено в **табл. 2**.

Снимки использованных в исследовании порошков получены методом сканирующей электронной микроскопии науглероженных материалов на оборудовании Tescan Vega 3 и показаны на **рис. 1**.

Таблица 1. Химический состав образцов фосфогипса различного генеза, мас. %

Table 1. Chemical composition of different originated phosphogypsum samples, wt. %

Номер образца	Регион	Особенности	Химический состав, мас. %						
			CaO	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SrO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ln <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	Кингисепп	Дигидрат (отвальный)	41,39	55,97	1,73	0,22	0,19	0,18	0,32
2	Кингисепп	Дигидрат (свежеполученный)	41,01	55,68	2,49	0,20	0,19	0,10	0,33
3	Череповец	Полугидрат (свежеполученный)	38,70	58,39	1,62	0,57	0,40	0,11	0,21
4	Череповец	Дигидрат (свежеполученный)	38,59	58,52	1,67	0,51	0,42	0,11	0,18

Таблица 2. Содержание редкоземельных элементов в образцах фосфогипса различного генеза, мас. %  
Table 2. Rare earth elements content in different originated phosphogypsum samples, wt. %

Номер образца	Регион	Особенности	Содержание редкоземельных элементов, мас. %						
			Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	Кингисепп	Дигидрат (отвальный)	0,10	0,09	0,05	0,03	0,04	0,01	-
2	Кингисепп	Дигидрат (свежеполученный)	0,09	0,09	0,03	0,03	0,06	0,03	-
3	Череповец	Полугидрат (свежеполученный)	0,08	0,01	0,03	0,01	0,05	-	0,03
4	Череповец	Дигидрат (свежеполученный)	0,07	0,01	0,02	0,02	0,04	-	0,02

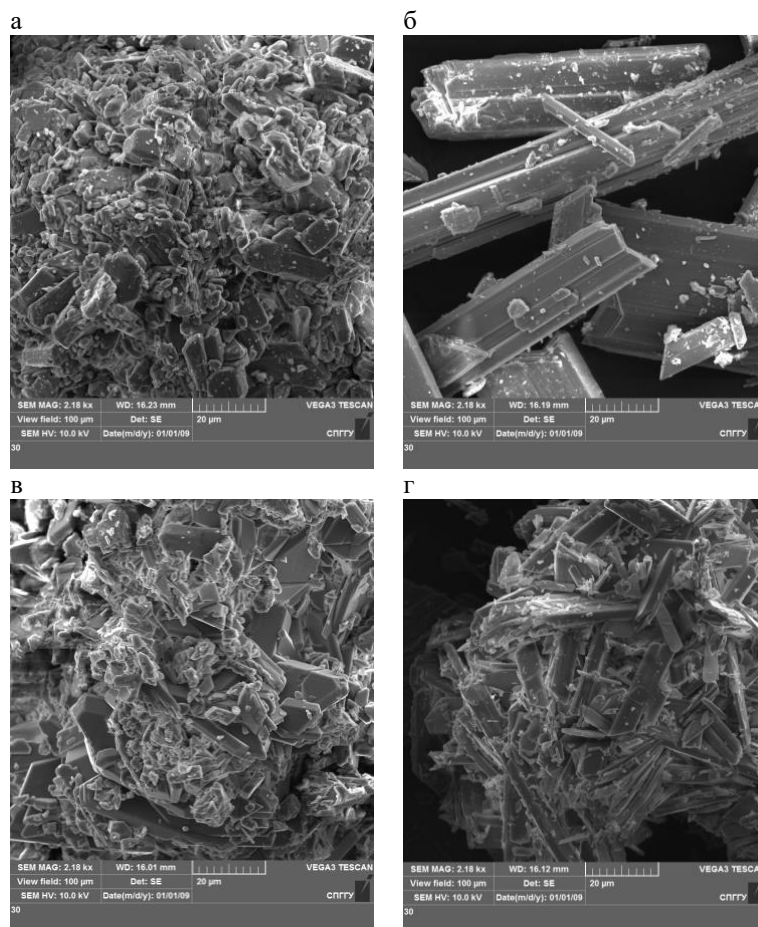


Рис. 1. Снимки образцов фосфогипса различного генеза: а – образец 1; б – образец 2; в – образец 3; г – образец 4

Fig. 1. Images of different originated phosphogypsum samples: а is sample 1; б is sample 2; в is sample 3; г is sample 4

Согласно исследованию морфологии порошков ФГ, частицы объединены в зернистые агрегаты и отличаются друг от друга степенью кристалличности. Образец 2 является наиболее кристаллизованным, он состоит из множества столбчатых кристаллов, обладающих преимущественно призматическим и ромбоэдрическим габитусом. Агрегаты образцов 3 и 4 представляют собой зерна неправильной формы в комбинации с пластинчатыми кристаллами. Среди рассмотренных порошков образец 1 характеризуется меньшей кристалличностью: мелкозернистый агрегат,

содержащий незначительное количество столбчатых кристаллов.

Степень конверсии  $\alpha$  сульфата кальция в карбонат кальция рассчитана как отношение общей массы серы в продуктивном растворе к общей массе серы в исходном образце ФГ по формуле

$$\alpha = \frac{m(S)_{\text{ж}}}{m(S)_{\text{т}}} \cdot 100\% . \quad (2)$$



Степень извлечения РЗЭ из ФГ в раствор вычислена как для каждого отдельного металла (Ln), так и для суммы РЗЭ ( $\Sigma \text{Ln}$ ) аналогичного расчету степени конверсии и представлена формулами

$$E = \frac{m(\text{Ln})_{\text{ж}}}{m(\text{Ln})_{\text{т}}} \cdot 100\%; \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{m(\Sigma \text{Ln})_{\text{ж}}}{m(\Sigma \text{Ln})_{\text{т}}} \cdot 100\%. \quad (4)$$

С целью обоснования отсутствия или наличия необходимости барботирования углекислым газом пульпы фосфогипса в ходе конверсии проведена серия экспериментов по установлению влияния pH на степень извлечения РЗЭ в раствор из синтетических фосфатов в среде карбонат-иона.

Варианты последующего выделения РЗЭ из растворов опробованы на модельных карбонатных комплексах, полученных из фосфатов церия и иттербия по уравнению



В качестве осадителей РЗЭ были применены насыщенные при стандартных условиях растворы щавелевой кислоты и оксалата натрия, а также раствор фосфорной кислоты концентрацией 5 моль/л. Элементный состав осадков определяли методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на оборудовании Epsilon 3.

### Полученные результаты и их обсуждение

Результаты экспериментов по установлению влияния pH на степень извлечения некоторых РЗЭ (рис. 2) проведены с использованием 2 М раствора  $\text{K}_2\text{CO}_3$  при температуре 90°C и времени, необходимом для достижения состояния, близкого к равновесному. pH раствора изменяли за счет дополнительного внесения гидроксида калия или соляной кислоты. При pH более 12,5 наблюдается снижение степени извлечения РЗЭ из-за образования малорастворимых гидроксидов. При подкислении раствора степень извлечения РЗЭ также снижается, из чего следует, что образующиеся гидрокарбонат-анионы не способствуют лучшему протеканию процесса комплексобразования. В этой связи барботирование углекислым газом, часто применяемое при организации процесса конверсии по газожидкостному варианту, не приведет к положительному эффекту.

Конверсию фосфогипса проводили раствором карбоната калия концентрацией 4 М при перемешивании в течение 3 ч, при температуре 90°C и межфазном отношении 100 мл на 1 г ФГ. Степень превращения сульфата кальция в мел составила более 96% для каждого из четырех образцов (табл. 3).

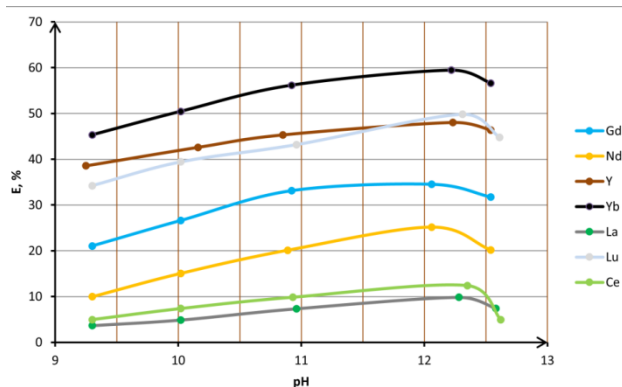


Рис. 2. Влияние pH на степень извлечения редкоземельных металлов из их фосфатов

Fig. 2. The influence of pH on the degree of rare earth metals extraction from phosphates

Таблица 3. Степень конверсии сульфата кальция, %  
Table 3. Calcium sulphate conversion level, %

Номер образца	Регион	Особенности	Степень конверсии $\alpha$ , %
1	Кингисепп	Дигидрат (отвальный)	96,4
2	Кингисепп	Дигидрат (свежеполученный)	98,4
3	Череповец	Полугидрат (свежеполученный)	98,0
4	Череповец	Дигидрат (свежеполученный)	97,3

Согласно полученным значениям, конверсия отвального фосфогипса (образец 1) протекает чуть хуже, чем свежеполученных образцов. На основании сопоставления структуры образцов ФГ (см. рис. 1) и степени конверсии можно сделать вывод о том, что порошки 2, 3 и 4 превращаются в мел лучше из-за более выраженной кристалличности, в то время как образец 1 является мелкозернистым агрегатом, содержащим незначительное количество столбчатых кристаллов. Изменение морфологии образца 1 в процессе нахождения в отвале, вероятно, связано с воздействием условий окружающей среды, что косвенно подтверждается отличием оттенков исходных порошков: образец 1 – темно-серый, образцы 2–4 – светло-серые.

Попутное извлечение РЗЭ в раствор представлено в виде диаграммы (рис. 3). Степень извлечения составила: La – 40,1%, Ce – 58,2%, Nd – 62,5%, Dy – 64,0%, Er – 66,4%, Y – 72,9%, Yb – 76,8%.

Таким образом, выщелачиванию лучше поддаются представители тяжелых РЗЭ. Полученные данные коррелируют с ранее проведенными экспериментами по растворению синтетических осадков в среде карбонат-иона. Общий процент извлечения из ФГ составил: из образца 1 – 58,6%, из образца 2 – 64,6%, из образца 3 – 67,4%, из образца 4 – 68,2%. Процент выщелачивания РЗЭ из отвального ФГ ниже, чем из свежеполученных образцов.

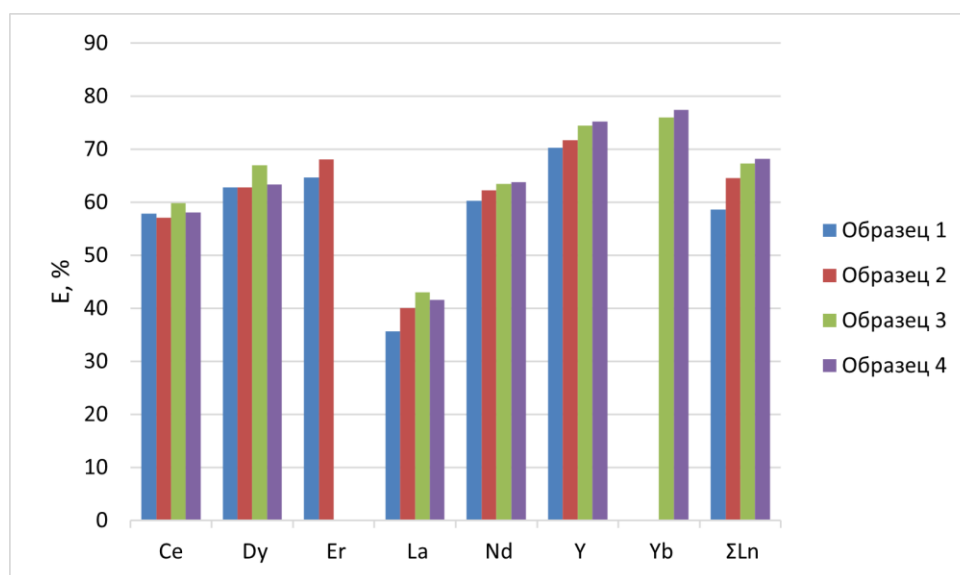


Рис. 3. Степень извлечения редкоземельных металлов из фосфогипса различного генеза  
Fig. 3. Degree of rare earth metals extraction from different originated phosphogypsum

Осадительные методы исследованы на примере карбонатного комплекса церия и основаны на разрушении структуры комплексного иона, причем использование оксалата натрия не привело к образованию осадка, в то время как применение щавелевой и фосфорной кислоты позволило произвести осаждение РЗЭ. Из чего следует, что разрушение карбонатных комплексов происходит под действием  $H^+$  с переходом  $Ln(CO_3)_n^{3-2n}$  в форму  $Ln^{3+}$  с последующим связыванием с анионом осадителя.

Так, под действием насыщенного раствора щавелевой кислоты наблюдается образование нерастворимого оксалата церия (III) (результаты рентгенофлуоресцентного анализа представлены на **рис. 4**), под действием 5 М фосфорной кислоты – нерастворимого

фосфата церия (III) (результаты рентгенофлуоресцентного анализа приведены на **рис. 5**). Подтверждением служат соответствующие спектральные пики: Ce, LA; Ce, LB1; Ce, LB2; Ce, LB3; Ce, LG и Ce, LA; Ce, LB1; Ce, LB2; Ce, LB3; P, KA.

Для самых распространенных комплексных ионов ( $Ln(CO_3)_2^-$  и  $LnCO_3^+$ ) взаимодействие с щавелевой и фосфорной кислотами описано уравнениями

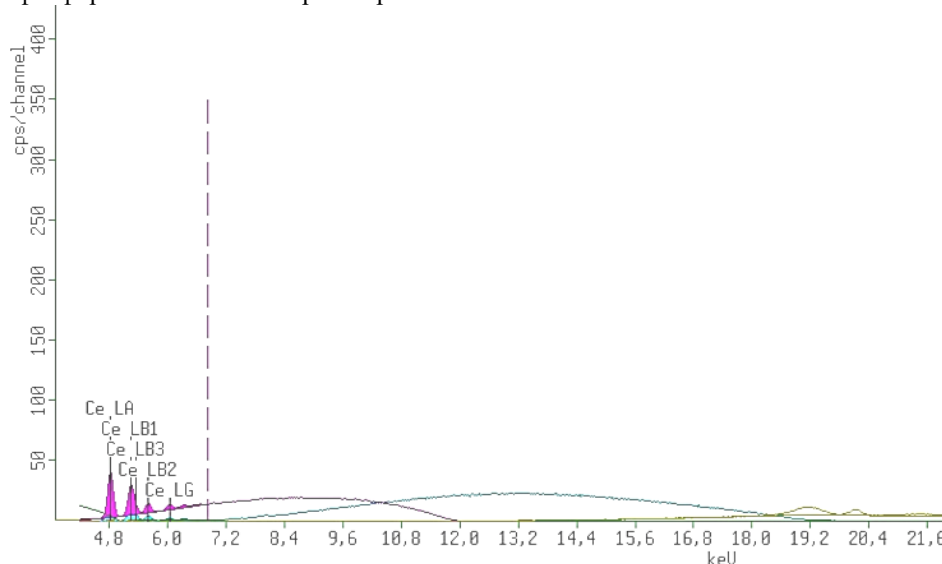
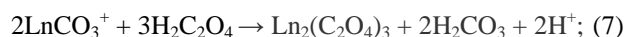
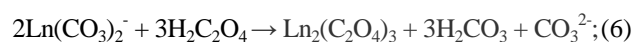
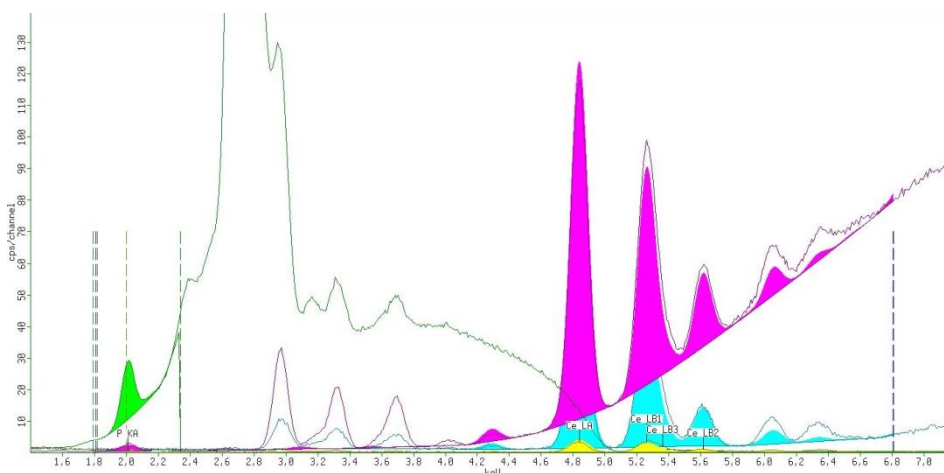


Рис. 4. Результаты рентгенофлуоресцентного анализа осадка  $Ce_2(C_2O_4)_3$   
Fig. 4. The results of X-ray fluorescence analysis of  $Ce_2(C_2O_4)_3$  precipitate

Рис. 5. Результаты рентгенофлуоресцентного анализа осадка  $\text{CePO}_4$ Fig. 5. The results of X-ray fluorescence analysis of  $\text{CePO}_4$  precipitate

### Заключение

Таким образом, карбонатно-щелочной метод позволяет комплексно перерабатывать фосфогипс различного генеза вне зависимости от типа исходного сырья (апатит или фосфорит), технологии его образования (дигидрат или полугидрат) и времени от момента его возникновения (свежеполученный или отвальный). Однако в случае отвального ФГ для увеличения степени конверсии сульфата кальция и степени извлечения РЗЭ необходимо применение механической активации ввиду изменения морфологии при нахождении в отвале под действием условий окружающей среды: УФ-излучение, изменение температуры, изменение влажности.

Для последующего выделения РЗЭ из растворов выщелачивания технически осуществимы осадительные методы, например оксалатный или фосфатный вариант. В случае коллективного осаждения РЗЭ в виде оксалатов представляется целесообразным их последующее прокаливание для получения концентрата оксидов РЗЭ с дальнейшим разделением на группы или индивидуальные компоненты по традиционной нитратной или хлоридной схеме.

Фосфатный вариант выделения РЗЭ может быть применен для создания изоляционных материалов для хранения радиоактивных отходов на основе  $\text{LnPO}_4$  благодаря их химической инертности и устойчивости при изменении температуры.

### Список литературы

- Ogata T., Narita H. Separation of Adjacent Light Rare Earth Elements Using Silica Gel Modified with Diglycolamic Acid. *Materials*. 2024, 17, 2648. <https://doi.org/10.3390/ma17112648>
- Di J., Ding X. Complexation of REE in Hydrothermal Fluids and Its Significance on REE Mineralization. *Minerals*. 2024, 14, 531. <https://doi.org/10.3390/min14060531>
- Podmiljšak B., Saje B., Jenuš P., Tomše T., Kobe S., Žužek K., Šturm S. The Future of Permanent-Magnet-Based Electric Motors: How Will Rare Earths Affect

- Electrification? *Materials*. 2024, 17, 848. <https://doi.org/10.3390/ma17040848>
- Behrsing T., Blair V.L., Jaroschik F., Deacon G.B., Junk P.C. Rare Earths—The Answer to Everything. *Molecules*. 2024, 29, 688. <https://doi.org/10.3390/molecules29030688>
- Pathapati S.V.S.H., Free M.L., Sarswat P.K. A Comparative Study on Recent Developments for Individual Rare Earth Elements Separation. *Processes*. 2023, 11, 2070. <https://doi.org/10.3390/pr11072070>
- Cherepovitsyn A., Solovyova V., Dmitrieva D. New challenges for the sustainable development of the rare-earth metals sector in Russia: Transforming industrial policies. *Resources Policy*. 2023, 81, 103347. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103347>
- Okrugin A., Zhuravlev A. Mineralogical and Geochemical Evidence of Paragenetic Unity of Igneous Silicate and Carbonate Rocks of the Tomtor Massif in the North-East of the Siberian Platform. *Minerals*. 2023, 13, 211. <https://doi.org/10.3390/min13020211>
- Lutskiy D.S., Lukyantseva E. S., Mikheeva V.Y., Grigorieva L.V. Investigation of the extraction of samarium and gadolinium from leaching solutions of phosphorus-containing raw materials using solid extractants. *Arab Journal of Basic and Applied Sciences*. 2023, 30(1), 68–73. <https://doi.org/10.1080/25765299.2022.2157954>
- Ormerod J., Karati A., Baghel A.P.S., Prodius D., Nlebedim I.C. Sourcing, Refining and Recycling of Rare-Earth Magnets. *Sustainability*. 2023, 15, 14901. <https://doi.org/10.3390/su152014901>
- Papagianni S., Moschovi A.M., Sakkas K.M., Chalaris M., Yakoumis I. Preprocessing and Leaching Methods for Extraction of REE from Permanent Magnets: A Scoping Review. *AppliedChem*. 2022, 2, 199–212. <https://doi.org/10.3390/appliedchem2040014>
- Akcil A., Swami K.R., Gardas R.L., Hazrati E., Dembele S. Overview on Hydrometallurgical Recovery of Rare-Earth Metals from Red Mud. *Minerals*. 2024, 14, 587. <https://doi.org/10.3390/min14060587>
- Pirzada M.D.S. Alternative Resources of Rare Earth Elements in Pakistan. *Mater. Proc.* 2024, 17, 26. <https://doi.org/10.3390/materproc2024017026>

13. Mukaba J.-L., Eze C.P., Pereao O., Petrik L.F. Rare Earths' Recovery from Phosphogypsum: An Overview on Direct and Indirect Leaching Techniques. *Minerals*. 2021 11, 1051. <https://doi.org/10.3390/min11101051>
14. Amirshahi S., Jorjani E. Preliminary Flowsheet Development for Mixed Rare Earth Elements Production from Apatite Leaching Aqueous Solution Using Biosorption and Precipitation. *Minerals*. 2023, 13, 909. <https://doi.org/10.3390/min13070909>
15. Levickaya K., Alfimova N., Nikulin I., Kozhukhova N., Buryanov A. The Use of Phosphogypsum as a Source of Raw Materials for Gypsum-Based Materials. *Resources*. 2024, 13, 69. <https://doi.org/10.3390/resources13050069>
16. Пашкевич М.А., Данилов А.С. Экологическая безопасность и устойчивое развитие // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 153-154.
17. Pliaka, M., Gaidajis, G. Potential uses of phosphogypsum: A review. *Journal of environmental science and health. Part A, Toxic/hazardous substances & environmental engineering*. 2022, 57(9), 746–763. <https://doi.org/10.1080/10934529.2022.2105632>
18. Al-Thyabat S., Zhang P. Extraction of rare earth elements from upgraded phosphate flotation tailings. *Minerals & Metallurgical Processing*. 2016, 33 (1). <https://doi.org/10.19150/mmp.6464>
19. Семячков А.И., Почечун В.А., Семячков К.А. Гидрогео-экологические условия техногенных подземных вод в объектах размещения отходов // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 168-179. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.24>
20. Ribeiro P.G., Dinali G.S., Boldrin P.F. et al. Rare Earth Elements (REEs) Rich-Phosphate Fertilizers Used in Brazil are More Effective in Increasing Legume Crops Yield Than Their REEs-Poor Counterparts. *Int. J. Plant Prod.* 2021, 15, 1–1. <https://doi.org/10.1007/s42106-021-00129-5>
21. Ramos S.J., Dinali G.S., Carvalho T.S., Chaves L.C., Siqueira J.O., Guilherme L.R. Rare earth elements in raw materials and products of the phosphate fertilizer industry in South America: Content, signature, and crystalline phases. *Journal of Geochemical Exploration*. 2016, 168, 177-186. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.06.009>
22. Wen F., Fan Y., Wu J., Yao W. Analysis of the Mechanical Properties of Cured Sludge by Alkaline Excitation of Phosphogypsum. *Buildings*. 2024, 14, 646. <https://doi.org/10.3390/buildings14030646>
23. Levickaya K., Alfimova N., Nikulin I., Kozhukhova N., Buryanov A. The Use of Phosphogypsum as a Source of Raw Materials for Gypsum-Based Materials. *Resources*. 2024, 13, 69. <https://doi.org/10.3390/resources13050069>
24. Pyagai I., Zubkova O., Babykin R., Toropchina M., Fediuk R. Influence of Impurities on the Process of Obtaining Calcium Carbonate during the Processing of Phosphogypsum. *Materials*. 2022, 15, 4335. <https://doi.org/10.3390/ma15124335>
25. Chen Y., Fan X., Zhao B., Zhang L. Numerical Simulation of Pre-Reduction for a New Process of Acid Production from Phosphogypsum by Gas Sulfur Reduction. *Processes*. 2023, 11, 972. <https://doi.org/10.3390/pr11030972>
26. Kang C.-U., Ji S.-W., Jo H. Recycling of Industrial Waste Gypsum Using Mineral Carbonation. *Sustainability*. 2022, 14, 4436. <https://doi.org/10.3390/su14084436>
27. Zhou Q., Liao J., Liao C., Zhao B. Phase Equilibrium Study of Rare Earth Oxide–Fluoride Salt System: A Review. *Metals*. 2024, 14, 314. <https://doi.org/10.3390/met14030314>
28. Han J., Wang Y., Liu R. et al. Theoretical and experimental investigation of Xenotime-type rare earth phosphate REPO<sub>4</sub>, (RE=Lu, Yb, Er, Y and Sc) for potential environmental barrier coating applications. *Sci Rep.* 2020, 10, 13681. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70648-0>
29. Экогeотехнология добычи бедных руд с созданием условий для попутной утилизации отходов горного производства / Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Рожков А.А., Соломеин Ю.М. // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 289-296. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.21>
30. Yang Y., Zhang X., Li L., Wei T., Li K. Metastable Dissolution Regularity of Nd<sup>3+</sup> in Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> Solution and Mechanism. *ACS Omega*. 2019, 4, pp. 9160-9168. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b00453>
31. Уран в антропогенных карбонатах на территории Уфы / Фархутдинов И.М., Хайруллин Р.Р., Соктоев Б.Р., Злобина А.Н., Чесалова Е.И., Фархутдинов А.М., Ткачев А.В. // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 226-237. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.4>
32. Chernysh Y., Chubur V., Abdieva I., Skvortsova P., Yakhsenkov O., Skydanenko M., Plyatsuk L., Roubík H. Soil Contamination by Heavy Metals and Radionuclides and Related Bioremediation Techniques: A Review. *Soil Syst.* 2024, 8, 36. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8020036>
33. Cheremisina O., Ponomareva M., Sergeev V., Mashukova Y., Balandinsky D. Extraction of Rare Earth Metals by Solid-Phase Extractants from Phosphoric Acid Solution. *Metals*. 2021, 11, 991. <https://doi.org/10.3390/met11060991>
34. Lobacheva O.L. Ion Flotation of Ytterbium Water-Salt Systems—An Innovative Aspect of the Modern Industry. *Water*. 2021, 13, 3493. <https://doi.org/10.3390/w13243493>
35. Сорбционная очистка вод кислотонакопителя от железа и титана на органических полимерных материалах / Черемисина О.В., Пономарева М.А., Молотилова А.Ю., Машукова Ю.А., Соловьев М.А. // Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 971-980. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.28>

## References

1. Ogata T., Narita H. Separation of Adjacent Light Rare Earth Elements Using Silica Gel Modified with Diglycolamic Acid. *Materials*. 2024;17;2648. <https://doi.org/10.3390/ma17112648>
2. Di J., Ding, X. Complexation of REE in Hydrothermal Fluids and Its Significance on REE Mineralization. *Minerals*. 2024;14:531. <https://doi.org/10.3390/min14060531>
3. Podmiljšak B., Saje B., Jenuš P., Tomše T., Kobe S., Žužek K., Šturm S. The Future of Permanent-Magnet-Based Electric Motors: How Will Rare Earths Affect Electrification? *Materials*. 2024;17:848. <https://doi.org/10.3390/ma17040>
4. Behrsing T., Blair V.L., Jaroschik F., Deacon G.B., Junk P.C. Rare Earths - The Answer to Everything. *Molecules*. 2024;29:688. <https://doi.org/10.3390/molecules29030688>
5. Pathapati S.V.S.H., Free M.L., Sarwat P.K. A Comparative Study on Recent Developments for Individual Rare



- Earth Elements Separation. Processes. 2023;11:2070. <https://doi.org/10.3390/pr11072070>
6. Cherepovitsyn A., Solovyova V., Dmitrieva D. New challenges for the sustainable development of the rare-earth metals sector in Russia: Transforming industrial policies. *Resources Policy*. 2023;81:103347b. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103347>
  7. Okrugin A., Zhuravlev A. Mineralogical and Geochemical Evidence of Paragenetic Unity of Igneous Silicate and Carbonatite Rocks of the Tomtor Massif in the North-East of the Siberian Platform. *Minerals*. 2023;13:211. <https://doi.org/10.3390/min13020211>
  8. Lutskiy D. S., Lukyantseva E. S., Mikheeva V. Y., Grigorieva L. V. Investigation of the extraction of samarium and gadolinium from leaching solutions of phosphorus-containing raw materials using solid extractants. *Arab Journal of Basic and Applied Sciences*. 2023;30(1):68-73. <https://doi.org/10.1080/25765299.2022.2157954>
  9. Ormerod J., Karati A., Baghel A.P.S., Prodius D., Nlebedim I.C. Sourcing, Refining and Recycling of Rare-Earth Magnets. *Sustainability*. 2023;15:14901. <https://doi.org/10.3390/su152014901>
  10. Papagianni S., Moschovi A.M., Sakkas K.M., Chalaris M., Yakoumis, I. Preprocessing and Leaching Methods for Extraction of REE from Permanent Magnets: A Scoping Review. *AppliedChem*. 2022;2:199-212. <https://doi.org/10.3390/appliedchem2040014>
  11. Akcil A., Swami K.R., Gardas R.L., Hazrati E., Dembele S. Overview on Hydrometallurgical Recovery of Rare-Earth Metals from Red Mud. *Minerals*. 2024;14:587. <https://doi.org/10.3390/min14060587>
  12. Pirzada M.D.S. Alternative Resources of Rare Earth Elements in Pakistan. *Mater. Proc.* 2024;17:26. <https://doi.org/10.3390/materproc2024017026>
  13. Mukaba J.-L., Eze C.P., Pereao O., Petrik L.F. Rare Earths' Recovery from Phosphogypsum: An Overview on Direct and Indirect Leaching Techniques. *Minerals*. 2021;11:1051. <https://doi.org/10.3390/min11101051>
  14. Amirshahi S., Jorjani E. Preliminary Flowsheet Development for Mixed Rare Earth Elements Production from Apatite Leaching Aqueous Solution Using Biosorption and Precipitation. *Minerals*. 2023;13:909. <https://doi.org/10.3390/min13070909>
  15. Levickaya K., Alfimova N., Nikulin I., Kozhukhova N., Buryanov A. The Use of Phosphogypsum as a Source of Raw Materials for Gypsum-Based Materials. *Resources*. 2024;13:69. <https://doi.org/10.3390/resources13050069>
  16. Pashkevich M.A., Danilov A.S. Ecological security and sustainability. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2023;260:153-154. (In Russ.)
  17. Pliaka M., Gaidajis G. Potential uses of phosphogypsum: A review. *Journal of environmental science and health. Part A, Toxic/hazardous substances & environmental engineering*. 2022;57(9):746-763. <https://doi.org/10.1080/10934529.2022.2105632>
  18. Al-Thyabat S., Zhang P. Extraction of rare earth elements from upgraded phosphate flotation tailings. *Minerals & Metallurgical Processing*. 2016;33(1). <https://doi.org/10.19150/mmp.6464>
  19. Semyachkov A.I., Pochechun V.A., Semyachkov K.A. Hydrogeoecological conditions of technogenic groundwater in waste disposal sites. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2023;260:168-179. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.24>
  20. Ribeiro P.G., Dinali G.S., Boldrin P.F., et al. Rare Earth Elements (REEs) Rich-Phosphate Fertilizers Used in Brazil are More Effective in Increasing Legume Crops Yield Than Their REEs-Poor Counterparts. *Int. J. Plant Prod.* 2021;15:1-1. <https://doi.org/10.1007/s42106-021-00129-5>
  21. Ramos S.J., Dinali G.S., Carvalho T.S., Chaves L.C., Siqueira J.O., Guilherme L.R. Rare earth elements in raw materials and products of the phosphate fertilizer industry in South America: Content, signature, and crystalline phases. *Journal of Geochemical Exploration*. 2016;168:177-186. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.06.009>
  22. Wen F., Fan Y., Wu J., Yao W. Analysis of the Mechanical Properties of Cured Sludge by Alkaline Excitation of Phosphogypsum. *Buildings*. 2024;14:646. <https://doi.org/10.3390/buildings14030646>
  23. Levickaya K., Alfimova N., Nikulin I., Kozhukhova N., Buryanov A. The Use of Phosphogypsum as a Source of Raw Materials for Gypsum-Based Materials. *Resources*. 2024;13:69. <https://doi.org/10.3390/resources13050069>
  24. Pyagai I., Zubkova O., Babykin R., Toropchina M., Fediuk R. Influence of Impurities on the Process of Obtaining Calcium Carbonate during the Processing of Phosphogypsum. *Materials*. 2022;15:4335. <https://doi.org/10.3390/ma15124335>
  25. Chen Y., Fan X., Zhao B., Zhang L. Numerical Simulation of Pre-Reduction for a New Process of Acid Production from Phosphogypsum by Gas Sulfur Reduction. *Processes*. 2023;11:972. <https://doi.org/10.3390/pr11030972>
  26. Kang C.-U., Ji S.-W., Jo H. Recycling of Industrial Waste Gypsum Using Mineral Carbonation. *Sustainability*. 2022;14:4436. <https://doi.org/10.3390/su14084436>
  27. Zhou Q., Liao J., Liao C., Zhao B. Phase Equilibrium Study of Rare Earth Oxide-Fluoride Salt System: A Review. *Metals*. 2024;14:314. <https://doi.org/10.3390/met14030314>
  28. Han J., Wang Y., Liu R. et al. Theoretical and experimental investigation of Xenotime-type rare earth phosphate REPO<sub>4</sub> (RE = Lu, Yb, Er, Y and Sc) for potential environmental barrier coating applications. *Sci Rep*. 2020;10:13681. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70648-0>
  29. Sokolov I.V., Antipin Y.G., Rozhkov A.A., Solomein Y.M. Environmental geotechnology for low-grade ore mining with the creation of conditions for the concurrent disposal of mining waste. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2023;260:289-296. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.21>
  30. Yang Y., Zhang X., Li L., Wei T., Li K. Metastable Disolution Regularity of Nd<sup>3+</sup> in Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> Solution and Mechanism. *ACS Omega*. 2019;4:9160-9168. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b00453>
  31. Farkhutdinov I.M., Khayrullin R.R., Soktoev B.R., Zlobina A.N., Chesalova E.I., Farkhutdinov A.M., Tkachev A.V. Uranium in man-made carbonates on the territory of Ufa. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2023;260:226-237. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.4>
  32. Chernysh Y., Chubur V., Ablieva I., Skvortsova P., Yakhnenko O., Skydanenko M., Plyatsuk L., Roubik H. Soil Contamination by Heavy Metals and Radionuclides and Related Bioremediation Techniques: A Review. *Soil Syst*. 2024;8:36. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8020036>

33. Cheremisina O., Ponomareva M., Sergeev V., Mashukova Y., Balandinsky D. Extraction of Rare Earth Metals by Solid-Phase Extractants from Phosphoric Acid Solution. *Metals*. 2021;11:991. <https://doi.org/10.3390/met11060991>
34. Lobacheva O.L. Ion Flotation of Ytterbium Water-Salt Systems - An Innovative Aspect of the Modern Industry. *Water*. 2021;13:3493. <https://doi.org/10.3390/w13243493>
35. Cheremisina O.V., Ponomareva M.A., Molotilova A.Y., Mashukova Y.A., Soloviev M.A. Sorption purification of acid storage facility water from iron and titanium on organic polymeric materials. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2023;264:971-980. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.28>

Поступила 09.09.2024; принята к публикации 29.10.2024; опубликована 30.06.2025  
Submitted 09/09/2024; revised 29/10/2024; published 30/06/2025

**Герасёв Степан Алексеевич** – аспирант,  
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.  
Email: gerashev111@mail.ru. ORCID 0000-0003-0612-7283

**Глазова Ксения Дмитриевна** – студент,  
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.  
Email: glazova29@gmail.com

**Курочкин Илья Олегович** – студент,  
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.  
Email: s220629@stud.spmi.ru

**Кузнецов Владимир Владимирович** – студент,  
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.  
Email: s220627@stud.spmi.ru

**Литвинова Татьяна Евгеньевна** – доктор технических наук, профессор,  
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.  
Email: viritsa@mail.ru. ORCID 0000-0002-0133-3400

**Stepan A. Gerashev** – Postgraduate Student,  
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.  
Email: gerashev111@mail.ru. ORCID 0000-0003-0612-7283

**Ksenia D. Glazova** – Student,  
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.  
Email: glazova29@gmail.com

**Ilya O. Kurochkin** – Student,  
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.  
Email: s220629@stud.spmi.ru

**Vladimir V. Kuznetsov** – Student,  
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.  
Email: s220627@stud.spmi.ru

**Tatiana E. Litvinova** – DrSc (Eng.), Professor,  
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.  
Email: viritsa@mail.ru. ORCID 0000-0002-0133-3400

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.34:622

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-71-77



## СЛОЖНООКСИДНАЯ КЕРАМИКА РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Шарипзянова Г.Х.

Московский политехнический университет, Москва, Россия

**Abstract.** Статья посвящена проблеме улучшения эксплуатационных показателей систем ядерных реакторов, актуальность которой возрастает с развитием научно-технического и технологического прогресса. Одним из условий успешного применения керамических материалов в качестве поглощающих элементов для реакторов на тепловых нейтронах является детальное изучение их микроструктуры и эксплуатационных свойств. Керамика на основе гафнатов и оксидов редкоземельных элементов в определенных условиях показывает высокую термостойкость и радиационную устойчивость, поэтому для достижения оптимальных нормативных эксплуатационных характеристик применяемых материалов крайне важно контролировать условия получения сложнооксидной керамики, что позволяет получить однофазные структуры с высокой плотностью и идеальной в данных условиях флюоритной решеткой. Такой подход к решению проблемы еще на стадии проектирования не только улучшает поглощающие свойства материалов, но и значительно увеличивает срок их службы в условиях высоких температур и нейтронного облучения. Исследования показывают, что добавление определенных оксидов редкоземельных металлов способствует улучшению механических свойств материалов, что делает их более долговечными и эффективными. Дальнейшее развитие этого направления открывает новые горизонты для повышения безопасности и эффективности ядерной энергетики. Материалы статьи представляют интерес при модернизации технологических процессов ядерных технологий на стадии проектирования и начального освоения, а также при подготовке специалистов высшей квалификации. Полученные в ходе комплексных исследований результаты нуждаются в дальнейшем осмыслении. Результаты исследований также показали, что гафнат диспрозия, как и другие материалы с неупорядоченной структурой, обладают высокой радиационной стойкостью. Установлено, что изменение состава обуславливает синтез, а использование различных методов позволяет получать материалы с дифференцированными свойствами, что непосредственно влияет на физические и эксплуатационные характеристики.

**Keywords:** керамика, синтез, ядерный реактор, поглощающий элемент, оптические покрытия

© Шарипзянова Г.Х., 2025

### Для цитирования

Шарипзянова Г.Х. Сложнооксидная керамика редкоземельных элементов для ядерных реакторов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 71-77. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-71-77>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

## COMPLEX OXIDE CERAMICS OF RARE EARTH ELEMENTS FOR NUCLEAR REACTORS

Sharipzyanova G.Kh.

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

**Аннотация.** The article is devoted to the problem of improving the operational performance of nuclear reactor systems, the relevance of which increases with the development of scientific, technical and technological progress. One of the conditions for the successful use of ceramic materials as absorbing elements for thermal neutron reactors is a detailed study of their microstructure and operational properties. Ceramics based on hafnates and oxides of rare earth elements under certain conditions shows high heat resistance and radiation resistance, therefore, in order to achieve optimal regulatory operational characteristics of the materials used, it is extremely important to control the conditions for obtaining complex oxide ceramics, which allows obtaining single-phase structures with high density and an ideal fluorite lattice in these conditions. Such an approach to solving the problem at the design stage not only improves the absorbing properties of materials, but also significantly increases their service life under high temperatures and neutron irradiation. Research shows that adding certain rare earth metal oxides improves the mechanical properties of materials, making them more durable and efficient. Further development of this area opens up new horizons for improving the safety and efficiency of nuclear power. The materials of the article are of interest in modernizing technological processes of nuclear technologies at the design and initial development stage, as well as in training highly qualified specialists and ordinary readers. The results obtained in the course of complex studies require further understanding. The results of the studies also showed that dysprosium hafnate, like other materials with a disordered structure, have high radiation resistance. It has been established that a change in composition determines synthesis, and the use of various methods allows obtaining materials with differentiated properties, which directly affects the physical and operational characteristics.

**Ключевые слова:** ceramics, synthesis, technology, nuclear reactor, absorbing element

*For citation*

Sharipzyanova G.Kh. Complex Oxide Ceramics of Rare Earth Elements for Nuclear Reactors. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 71-77. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-71-77>

**Введение**

Прогресс постиндустриального периода требует создания новых материалов с уникальными свойствами, которые должны обеспечить эффективную работу износостойких и термостойких материалов для энергетического и иного высокотехнологичного оборудования. Гафнаты редкоземельных элементов могут быть использованы как носители катализаторов при использовании термобарьерных покрытий для получения сверхпроводящих материалов, люминофоров и других уникальных материалов.

В связи с проектированием перспективных реакторных установок нового поколения выбор поглощающего материала для кластерного органа регулирования (КРО) становится критически важным этапом. В настоящее время во многих установках в качестве материала для поглощающих элементов (ПЭЛ) используется карбид бора, который отличается своей высокой физической и химической стабильностью при тепловых воздействиях, а также низкой активностью. Его эффективность состоит в поглощении нейтронов изотопом  $^{10}\text{B}$ , поэтому он используется для регулирования выделения энергии в реакторах на быстрых нейтронах. Кроме того, сравнительно низкая стоимость и минимальная наведённая активность отработавших стержней значительно упрощают и удешевляют процесс хранения и переработки.

Современные ПЭЛ основаны на сложных оксидах лантаноидов [1, 2], таких как диспрозий и европий, что улучшает их технологические характеристики и расширяет возможности для эффективного контроля ядерных реакций [3].

Сложнооксидная керамика, основанная на оксидах редкоземельных элементов, представляет собой линейку уникальных материалов с большим потенциалом для их применения в качестве поглощающих элементов в ядерных реакторах [3, 4]. Эти материалы обладают рядом значимых свойств, делающих их особенно привлекательными для использования в качестве поглощающих элементов в современных установках ядерного реактора.

Сложнооксидная керамика редкоземельных элементов характеризуется высокой плотностью, что позволяет ей эффективно замедлять и поглощать нейтроны [5, 6].

Одной из ключевых проблем при эксплуатации ядерных реакторов является коррозия материалов в условиях повышенной температуры и давления. Сложнооксидная керамика демонстрирует высокую устойчивость к коррозии в водяном паре, что значительно повышает их долговечность [7, 8]. Материалы для ядерных реакторов должны выдерживать интенсивное облучение без существенной потери своих свойств. Керамика на основе редкоземельных элементов обладает высокой радиационной стойкостью, что позволяет использовать ее в течение длительного времени.



Учитывая перечисленные выше преимущества, сложнооксидная керамика редкоземельных элементов рассматривается как перспективный материал для создания новых поколений поглощающих элементов ядерных реакторов. Она может способствовать повышению безопасности и эффективности эксплуатации ядерных установок [8, 9].

Перед внедрением керамики в промышленное производство необходимо провести исследования, направленные на оптимизацию ее свойств и разработку соответствующих технологий производства [10, 11].

### Материалы и методы исследования

Для проведения исследований использовались следующие исходные материалы:

- оксиды редкоземельных элементов;
- реактивы для проведения золь-гель-синтеза;
- газовые среды: в качестве газовой среды при термической обработке материалов используется вакуум;
- подложки: используются различные подложки для нанесения тонких пленок, материал не уточняется.

#### Методы синтеза материалов:

- Твердофазный синтез: исходные оксиды тщательно обрабатывались в заданных молярных соединениях, затем проводилась термообработка при высоких температурах (до 1600 °С) для получения поликристаллических порошков.

- Гибридный золь-гель-синтез: применялся для получения сложных оксидных соединений. Золь-гель-метод основан на введении легирующих добавок на основе растворов солей или алкоксидов в спирты с последующей термической обработкой для формирования оксидной структуры.

- Механическое перемещение: порошки перемещаются механическим способом для последовательного прессования в таблетках.

#### Методы формирования образцов:

- Горячее прессование: для получения более плотных и прочных таблеток-мишеней диаметром 80-100 мм применялось горячее прессование при температуре 1600°С и давлении 300 МПа.

- Электронно-лучевое напыление: для нанесения тонких пленок на подложки.

- Магнетронное напыление: для нанесения тонких пленок на подложки.

#### Методы исследования:

- Рентгенофазовый анализ: для определения фазового состава и кристаллической структуры полученных порошков и пленок используют механический дифрактометр.

- Элементный анализ: применялся для определения содержания элементов в электронных соединениях и пленках.

- Оптическая спектроскопия: изучались оптические характеристики, включая коэффициент пропускания и отражения пленок.

- Механические испытания: оценивалась механическая прочность, адгезия и твердость тонких пленок.

- Испытания на влагостойкость: проводились для оценки устойчивости пленки к влажной среде.

- Испытания на радиационную стойкость: оценивалась устойчивость материалов к радиационному климату.

- Термическая обработка: проводилась для изменения плотности и снижения пористости таблеток.

- Коррозионные испытания: для оценки устойчивости к коррозии.

### Полученные результаты и их обсуждение

Материалы, обладающие кристаллической структурой типа флюорита, создают уникальную устойчивость к радиационному солнечному свету. Это свойство, подтвержденное как экспериментальными исследованиями, так и теоретическими выводами, позволяет им сохранять свои характеристики даже в условиях интенсивного воздействия [12, 13].

Кристаллические структуры с большим количеством хаотично созданных вакансий в ионной решетке характеризуются тем, что атомы, смещенные со своих позиций под влиянием излучения, не могут перемещаться на значительные расстояния [14].

В области узнаваемости нейтронов гафнат диспрозия проявляет себя с повышенной эффективностью [15, 16]. В спектре нейтронов, разрядам для водо-водяных реакторов, таких как ВВЭР-1000, этот материал находится на 8-10%, что позволяет обеспечить устойчивость нейтронов по сравнению с титанатом диспрозия и сплавом 80%Ag-15%In-5%Cd [17].

Такое превосходство обусловлено особенностями атомного состава гафната диспрозия. Изотопы диспрозия ( $^{156}\text{Dy}$ ,  $^{158}\text{Dy}$ ,  $^{160}\text{Dy}$ ,  $^{161}\text{Dy}$ ,  $^{162}\text{Dy}$ ,  $^{163}\text{Dy}$  и  $^{164}\text{Dy}$ ) играют ключевую роль в группировке нейтронов, в их структуру входят изотопы гафния ( $^{174}\text{Hf}$  и  $^{177}\text{Hf}$ ), образующие значительные резонансные соединения в промежуточной части энергетического ядра нейтронов [18].

Важно отметить, что размеры распределения нейтронов для изотопов диспрозия и гафния в различных диапазонах энергий различны. Это позволяет, изменяя пропорцию Dy/Hf в составе материала, целенаправленно регулировать его эффективность разделения, сохраняя при этом кристаллическую структуру флюорита.

Возможно частичное замещение оксидов диспрозия и гафния в исходных источниках на химические аналоги. Так, оксид диспрозия может быть частично заменен оксидами других редкоземельных элементов, таких как гадолиний, эрбий или иттрий, оксид гафния – оксидом циркония. Благодаря химическому сходству этих элементов, такие преобразования не приводят к появлению дефектов кристаллической структуры материала и не снижают его высокую устойчивость к радиационному солнечному свету. В силу этих условий гафнат диспрозия представляет собой универсальный материал для объединения нейтронов с широким спектром возможностей для «настройки» его эффективности [19].

Технологические преимущества гафната диспрозия обусловили его стабильную однофазную структуру флюоритного твердого раствора во всех температурных условиях – от температуры нагрева до точки плавления [20].

Регулируя расположение Dy/Hf, можно точно «настроить» способность гафната диспрозия поглощать нейтроны [21].

Наиболее перспективны для тепловых водоохлаждаемых ядерных реакторов органы регулирования на основе гамма-поглотителей. В них образуются газообразные продукты ядерных реакций и они характеризуются более высокой, по сравнению с борсодержащими поглотителями, радиационной стойкостью [22]. Проведенные исследования показали, что перспективные поглощающие материалы для органов регулирования тепловых реакторов из гафната и титаната диспрозия в наибольшей степени соответствуют критериям работоспособности при длительной (более 15 лет) работе в АЗ ЯР ВВЭР-1000.

Первые опытные испытания поглощающих элементов с титанатом диспрозия в 5-м блоке НВАЭС позволили увеличить ресурсные характеристики в режиме автоматического регулирования до 4-х лет вместо 2-х лет штатных ПЭЛОВ с карбидом бора. Проведенные материаловедческие исследования показали, что ресурс ПЭЛОВ с  $Dy_2TiO_5$  далеко не исчерпан и эксплуатация их может быть продолжена [23].

Более 17 лет стержни СУЗ с титанатом диспрозия успешно отработали в исследовательском ядерном реакторе МИР, достигнув флюенса быстрых нейтронов  $2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$  ( $E > 0,1 \text{ МэВ}$ ). По сравнению с титанатом диспрозия, гафнат диспрозия имеет ряд дополнительных эксплуатационных преимуществ: более высокую радиационную и коррозионную стойкость, возможность одновременного использования его в качестве поглощающего и конструкционного материала, более высокую исходную эффективность поглощения нейтронов, меньшую скорость выгорания поглощающих изотопов [26].

Использование гибридного золь-гель-метода открывает возможности для создания сложных оксидных соединений с разнообразным химическим составом. Точное соблюдение стехиометрических соотношений достигается путем строгого дозирования исходных компонентов и контроля параметров процесса, таких как температура реакции и интенсивность перемешивания.

Введение легирующих примесей на основе редкоземельных элементов осуществляется как посредством растворов алкоксидов в спиртовой среде, так и с применением растворов солей. Данный подход позволяет синтезировать порошкообразные сложные оксиды, имеющие структуру перовскита, цеолита или граната и модифицированные различными редкоземельными элементами. Полученные материалы могут быть востребованы не только в керамическом производстве, но и в качестве катализаторов для органического синтеза. Применение данных порошков для создания керамических изделий позволяет значительно сократить затраты на оборудование и энергопотребление по сравнению с технологией выращивания монокристаллов [27].

Тонкие пленки, используемые в оптике, находят широчайшее применение в самых сложных областях, от точного приборостроения и исследований до лазерных технологий, спектроскопии и астрономических исследований.

В области материаловедения оксидные соединения представляют собой обширный класс веществ, уникаль-

ные физические и химические свойства открывают широкие перспективы для их применения в различных высокотехнологичных отраслях. Отличительной особенностью оксидных материалов является их устойчивость к экстремально высоким температурам, интенсивным механическим воздействиям, ионизирующему излучению, а также к агрессивным химическим средам. Пленки, созданные на основе оксидов, проявляют поразительную стойкость к этим факторам, что делает их незаменимыми в условиях, где требуется надежность и эксплуатация [28, 29].

Одной из наиболее важных характеристик оксидных материалов, обуславливающих их широкое применение в оптике, является их показатель преломления, который может заключаться в интервале от 1,45 до 2,6. Именно эта возможность позволяет использовать оксидные пленки в качестве слоев с различными проявлениями преломления, создавать многослойные оптические покрытия, способные эффективно работать в широком спектральном контексте. Многослойные покрытия дают желаемые оптические свойства, такие как превосходное рассеивание, отражение, или особые спектральные характеристики.

В результате с помощью оксидов таких соединений, как гафнаты, цирконаты и титанаты лантаноидов, наблюдается улучшенная эффективность, в том числе повышенная прочность и расширенный диапазон прозрачности. Эти свойства делают их перспективными для использования в различных средах, включая создание оптических систем, работающих в условиях высокого спроса. В частности, цирконат и титанат гадолиния обладают потенциалом для создания сложных покрытий, предназначенных для оптических систем, функционирующих в ближней и видимой зоне инфракрасного излучения.

При производстве оптических покрытий, помимо требуемых характеристик, важно учитывать и физико-механические свойства материалов, включая их агрегатное состояние. Соединения, используемые для нанесения пленок, должны быть либо в виде расплавов, либо в виде таблеток с высокой подсветкой. Даже незначительное разбрызгивание или испарение материала может привести к дефектам покрытия, поэтому таблетки должны обладать минимальной пористостью. Расплавы, как правило, используются при резистивном напылении, а таблетки применяются в методе электронно-лучевого напыления. Резистивное напыление хорошо подходит для материалов с низкой температурой плавления, в то время как электронно-лучевое напыление, когда материал испаряется под действием сфокусированного пучка электронов, позволяет наносить покрытия из тугоплавких материалов, таких как селениды, оксиды и сульфиды.

Гафнат гадолиния, как один из перспективных материалов для оптических покрытий, может быть получен несколькими способами. Одним из них является прямой синтез диоксида гафния и оксида гадолиния. Другой подход заключается в совместном осаждении аммиаком из растворов оксохлорида гафния и хлорида гадолиния с последующими этапами сушки и прокаливания для получения целевого оксида [30, 31].

Полученные порошки гафната гадолиния тщательно анализируются с помощью рентгенофазового анализа и элементного анализа, позволяющего установить фазовый состав и содержание элементов в материале. Далее для изучения свойств пленочных покрытий полученные порошки подвергают электронно-лучевому и магнетронному напылению. Затем были проведены детальные исследования по таким характеристикам, как механическая прочность, устойчивость к воздействию влаги и радиационная стойкость пленочных покрытий.

Исследования показывают, что при синтезе гафната гадолиния соотношение атомов гафния и гадолиния составляет 2:1, полученные соединения обладают кристаллической структурой типа флюорита. Важно отметить, что метод синтеза не оказывает существенного влияния на результаты рентгенофазового анализа.

При проведении электронно-лучевого напыления в качестве мишеней использовались таблетки гафната гадолиния диаметром 19-20 мм, полученные путем холодного прессования порошка при давлении 30 МПа и применении термической обработки. Таблетки, полученные синтезом из исходных оксидов, не соответствуют целям из-за недостаточной физической прочности. Для повышения плотности и минимизации пористости таблетки подвергают вакуумному отжигу при температуре 1400°C в течение трех часов [32].

В настоящее время при изготовлении оптических элементов, включенных в силовую оптику, предпочтение отдается магнетронному напылению. Для этого метода потребуются мишени диаметром 80-100 мм, которые невозможно получить при помощи холодного прессования из-за недостаточной прочности. Поэтому для производства мишеней используется метод горячего прессования при температуре 1600°C и давлении 300 МПа в течение трех часов. Этот метод позволяет получать более плотные и прочные мишени с минимальной пористостью [33].

Проведенные исследования подтвердили, что гафнат диспрозия обладает уникальными свойствами, такими как высокая радиационная стойкость и коррозионная устойчивость, что делает его перспективным материалом для использования в ядерных реакторах. Эксперименты показали, что варьирование соотношения Dy/Hf позволяет точно настраивать эффективность поглощения нейтронов, что особенно важно для реакторов типа ВВЭР-1000. Кроме того, частичное замещение оксидов диспрозия и гафния другими редкоземельными элементами, например гадолинием или иттрием, не нарушает кристаллическую структуру материала и сохраняет его эксплуатационные характеристики.

Также были изучены методы синтеза гафната гадолиния и его применение в оптических покрытиях. Установлено, что материал кристаллизуется в структуру типа флюорита независимо от способа получения. Для создания мишеней с низкой пористостью и высокой механической прочностью применялись методы горячего прессования и вакуумного отжига.

Эти результаты демонстрируют широкие возможности применения гафнатов редкоземельных

элементов не только в ядерной энергетике, но и в других высокотехнологичных областях, таких как оптика и катализ.

### Заключение

Основные научные результаты, полученные в работе:

1. Механохимический синтез в течение 30–60 мин позволяет получать порошки сложнооксидной керамики на основе редкоземельных элементов с заданными свойствами.

2. Гафнаты, цирконаты и титанаты редкоземельных металлов демонстрируют высокую радиационную стойкость и не образуют газообразных продуктов при выгорании, что упрощает их использование в ядерных реакторах.

3. Гафнат диспрозия обладает высокой эффективностью поглощения нейтронов, регулируемой за счет изменения соотношения Dy/Hf.

4. Частичное замещение оксидов диспрозия и гафния другими редкоземельными элементами не нарушает структуру материала, сохраняя его стабильность.

5. Гафнат гадолиния, полученный различными методами, сохраняет флюоритовую структуру и подходит для создания оптических покрытий.

6. Для производства мишеней с низкой пористостью эффективны методы горячего прессования и вакуумного отжига.

7. Гафнаты редкоземельных элементов перспективны для использования в ядерных реакторах, оптических системах и других высокотехнологичных областях благодаря их уникальным свойствам и возможности тонкой настройки характеристик.

8. Проведенные исследования открывают новые возможности для создания материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами, способствующих развитию современных технологий.

### Список литературы

1. Prospects for return of valuable components lost in tailings of light metals ore processing / Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Zyukin D.A., Karlina A.I. // Metallurgist. 2023, vol. 67, no. 1-2, pp. 96-103. DOI: 10.1007/s11015-023-01493-5.
2. Performance evaluation of functioning of natural-industrial system of mining-processing complex with help of analytical and mathematical models / Bosikov I.I., Klyuev R.V., Revazov V.Ch., Pilieva D.E. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018, vol. 327, p. 022013.
3. Третьяков Ю.Д., Метлин Ю.Г. Керамика – материал будущего. М.: Знание, 1987. 47 с.
4. Третьяков Ю.Д., Лепис Х. Химия и технология твердофазных материалов: учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 1985. 253 с.
5. Шевченко В.Я., Баринов С.М. Техническая керамика. М.: Наука, 1993. 192 с.



6. Толкачева А.С., Павлова И.А. Общие вопросы технологии тонкой керамики: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 184 с.
7. Балкевич В.Л. Техническая керамика. М.: Стройиздат, 1984. 256 с.
8. Yakovkina L.V., Kichai V.N., Smirnova T.P. Preparation and properties of thin  $\text{HfO}_2$  films // *Inorg. Mater.* 2005, vol. 41, pp. 1300-1304.
9. Andrievskaya E.R. Phase equilibria in the refractory oxide systems of zirconia, hafnia and yttria with rare-earth oxides // *Journal of the European Ceramic Society.* 2008, vol. 28, iss. 12, pp. 2363-2388.
10. Исследование содержания и возможности извлечения матричных и редких элементов из золотшлаковых отходов предприятия теплоэнергетики / Черкасова Т.Г., Черкасова Е.В., Тихомирова А.В., Гилязидинова Н.В., Клюев Р.В., Мартюшев Н.В., Карлина А.И., Скиба В.Ю. // *Металлург.* 2021. № 11. С. 96-100. DOI: 10.52351/00260827\_2021\_11\_96.
11. Термические и теплофизические свойства теплозащитных покрытий на основе цирконата лантана / И.В. Мазин, Л.Х. Балдаев, Д.В. Дробот, А.М. Ахметгареева, А.О. Жуков, А.Г. Хисматуллин // *Перспективные материалы.* 2013. №7. С. 21-30.
12. Шевченко В.Я., Баринов С.М. Техническая керамика. М.: Наука, 1993. 187 с.
13. Аввакумов Е.Г. Механохимический синтез в неорганической химии. Новосибирск: Наука, 1991. 264 с.
14. McCormick P.G., Froes F.H. The fundamentals of Mechanochemical processing. *JOM.* November, 1998, pp. 61-65.
15. Гусев А.И. Нанометриалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2005. 416 с.
16. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. М.: ИЦ «Академия», 2005. 192 с.
17. Рыжонков Д.И., Левина В.В., Дзидзигури Э.Л. Ультрасупердисперсные системы: получение, свойства, применение. М.: Учеба, 2010. 182 с.
18. Sol-gel synthesis and crystallization kinetics of dysprosium-titanate  $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$  for photonic applications / Potel M. et al. // *Mater. Chem. Phys.* 2015, vol. 168, pp. 159-167.
19. Radiation-induced amorphization resistance and radiation tolerance in structurally related oxides / Sickafus K.E. et al. // *Nat. Mater.* 2007, vol. 3, pp. 217-223.
20. Dysprosium hafnate as absorbing material for control rods / Risovany V.D. et al. // *J. Nucl. Mater.* 2006, vol. 355, pp. 163-170.
21. Risovany V.D., Varlashova E.E., Suslov D.N. Dysprosium titanate as an absorber material for control rods // *J. Nucl. Mater.* 2000, vol. 281, pp. 84-89.
22. Properties of Dysprosium Titanate as a Control Rod Material / Kim H.S. et al. 2007, pp. 10-11.
23. Hot Pressing Of Dysprosium Hafnate And Titanate Pellets / Krasnorutskii V.S. et al. 2012, vol. 50, no. 11, pp. 708-713.
24. Technology for nonwaste recovery of tailings of the mizur mining and processing plant / Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Zyukin D.A., Karlina A.I. // *Metallurgist.* 2023, vol. 66, no. 11-12, pp. 1476-1480. DOI: 10.1007/s11015-023-01462-y.
25. Рисованный В.Д., Захаров А.В., Муралева Е.М. Новые перспективные поглощающие материалы для ядерных реакторов на тепловых нейтронах // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение.* 2005. № 3 (86). С. 87-93.
26. Radiation stability of WVER-1000 CPS AR absorber element with boron carbide / Fridman S.R., Risovanny V.D., Zakharov A.V., Toporova V.G. // *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser. Physics of radiation damages and radiation science of materials.* 2001, no. 2, pp. 84-90.
27. Перова Е.Б., Спиридонов Л.Н., Комисарова Л.Н. Фазовые равновесия в системе  $\text{HfO}_2\text{-Dy}_2\text{O}_3$  // *Известия АН СССР. Неорганические материалы.* 1982. Т. 8. № 10. С. 1878-1882.
28. Махмудов Ф.А., Шаймарданов Э.Н., Кабгов Х.Б. Получение и свойства наноструктурированных оксидов диспрозия // *Доклады АН Республики Таджикистан.* 2013. Т. 56. Вып. 2. С. 130-134.
29. Thermophysical measurements on dysprosium and gadolinium titanates / Panneerselvam G. et al. // *J. Nucl. Mater.* 2004, vol. 327, pp. 220-225.
30. Jung C., Kim C., Lee S. Synthesis and sintering studies on  $\text{Dy}_2\text{TiO}_5$  prepared by polymer carrier chemical process // *J. Nucl. Mater.* 2006, vol. 354, pp. 137-142.
31. Mechanism of structure formation in samarium and holmium titanates prepared from mechanically activated oxides / Lyashenko L.P., Shcherbakova L.G., Kolbanev I.V., Knerel'man E.I., Davydova G.I. // *Inorg. Mater.* 2007, vol. 43, no. 1, pp. 46-54.
32. Регулирующий стержень ядерного реактора: патент Российской Федерации №2077741 от 20.04.1997. G21C7/10, G21C7/24 / Чернышов В.М., Ряховских В.И., Пославский А.О., Пономаренко В.Б., Маковский В.Д., Осадчий А.И.; Лукин Г.Л., Бирюков Г.И., Васильченко И.Н.
33. Ferroelectric perovskite nanopowders obtained by mechanochemical synthesis / Szafraniak-Wiza I., Hilczer B., Talik E., Pietraszko A., Malic B. // *Process. Appl. Ceram.* 2010, vol. 4, no. 3, pp. 99-106.

## References

1. Golik V. I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Zyukin D.A., Karlina A.I. Prospects for return of valuable components lost in tailings of light metals ore processing. *Metallurgist.* 2023;67(1-2):96-103. DOI: 10.1007/s11015-023-01493-5
2. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Revazov V.Ch., Pilieva D.E. Performance evaluation of functioning of natural-industrial system of mining-processing complex with help of analytical and mathematical models. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018;327:022013.
3. Tretyakov Yu.D., Metlin Yu.G. *Keramika – material budushchego* [Ceramics – the material of the future]. Moscow: Znanie, 1987, 47 p. (In Russ.).
4. Tretyakov Yu.D., Lepis H. *Khimiya i tekhnologiya tverdogaznykh materialov: uchebnoe posobie* [Chemistry and technology of solid-phase materials]. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1985, 253 p. (In Russ.).
5. Shevchenko V.Ya., Barinov S.M. *Tekhnicheskaya keramika* [Technical ceramics]. Moscow: Nauka, 1993, 192 p. (In Russ.).
6. Tolkacheva A.S., Pavlova I.A. *Obshchie voprosy tekhnologii tonkoy keramiki: ucheb. posobie* [General issues of fine ceramics technology: textbook]. Yekaterinburg: Ural Publishing House, 2018, 184 p. (In Russ.).
7. Balkevich V.L. *Tekhnicheskaya keramika* [Technical ceramics]. Moscow: Stroyizdat, 1984, 256 p. (In Russ.).
8. Yakovkina L.V., Kichai V.N., Smirnova T.P. Preparation and properties of  $\text{HfO}_2$  thin films. *Inorg. Mater.* 2005;41:1300-1304.



9. Andrievskaya E.R. Phase equilibria in refractory oxide systems of zirconium dioxide, hafnium and yttrium with oxides of rare earth elements. *Journal of the European Ceramic Society*. 2008;28(12):2363-2388.
10. Cherkasova T.G., Cherkasova E.V., Tikhomirova A.V., Gilyazidinova N.V., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Karlina A.I., Skiba V.Y. Study of matrix and rare elements in ash and slag waste of a thermal power plant concerning the possibility of their extraction. *Metallurg* [Metallurgist], 2021;(11):96-100. DOI: 10.52351/00260827\_2021\_11\_96.
11. Mazilin I. V., Baldaev L. H., Drobot D. V., Akhmetgareeva A.M., Zhukov A. O., Khismatullin A. G. Thermal and thermophysical properties of thermal protective coatings based on lanthanum zirconate. *Perspektivnye materialy* [Promising materials], 2013;(7):21-30.
12. Shevchenko V.Ya., Barinov S.M. *Tekhnicheskaya keramika* [Technical ceramics]. Moscow: Nauka, 1993, 187 p. (In Russ.).
13. Avvakumov E.G. *Mekhanohimicheskiy sintez v neorganicheskoy khimii* [Mechanochemical synthesis in inorganic chemistry]. Novosibirsk: Nauka, 1991, 264 p. (In Russ.).
14. McCormick P.G., Fros F.H. Fundamentals of mechanochemical processing. *JOM*. 1998;61-65.
15. Gusev A.I. *Nanometrialy, nanostruktury, nanotekhnologii* [Nanometrials, nanostructures, nanotechnology]. Moscow: Fizmatlit, 2005, 416 p. (In Russ.).
16. Andrievsky R.A., Ragulya A.V. *Nanostrukturnye materialy* [Nanostructured materials]. Moscow: Academy Publishing center, 2005, 192 p.
17. Ryzhonkov D.I., Levina V.V., Dzidziguri E.L. *Ultradispersnyye sistemy: poluchenie, svoystva, primeneniye* [Ultradisperse systems: preparation, properties, application]. Moscow: Studies, 2010, 182 p. (In Russ.).
18. Potel M. et al. Sol-gel synthesis and kinetics of crystallization of dysprosium titanate  $Dy_2Ti_2O_7$  for photonic applications. *Mater. Chem. Phys.* 2015;168:159-167.
19. Sikafus K.E. et al. Resistance to radiation-induced amorphization and radiation resistance of structurally related oxides. *Mater.* 2007;3:217-223.
20. Risovanny V.D. et al. Dysprosium hafnate as an absorbing material for control rods. *J. Nucl. Mater.* 2006;355:163-170.
21. Risovanny V.D., Varlashova E.E., Suslov D.N. Dysprosium titanate as an absorbent material for control rods. *J. Nucl. Mater.* 2000;281:84-89.
22. Kim H.S. et al. Properties of dysprosium titanate as a material for control rods. 2007, pp. 10-11.
23. Krasnorutsky V.S. et al. Hot pressing of granules of hafnate and dysprosium titanate. 2012;50(11):708-713.
24. Golik V. I., Klyuev R. V., Martyushev N. V., Zyukin D. A., Karlina A. I. Technology for nonwaste recovery of tailings of the mizur mining and processing plant. *Metallurgist*. 2023;66(11-12):1476-1480. DOI: 10.1007/s11015-023-01462-y.
25. Risovanny V.D., Zakharov A.V., Muraleva E.M. New promising absorbing materials for thermal neutron nuclear reactors. *Vopr. atom. nauki i tekhniki. Ser. Fizika radiats. povrezhdeniy i radiats. materialovedeniye* [Issues of atomic science and technology. Ser. Physics of radiation damage and radiation chemistry of materials], 2005;(3(86)):87-93.
26. Friedman S.R., Risovanny V.D., Zakharov A.V., Toporova V.G. Radiation resistance of the absorbing element CPS AR VVER-1000 with boron carbide. *Issues of atomic science and technology. Ser. Physics of radiation damage and radiation chemistry of materials*. 2001;(2):84-90.
27. Perova E.B., Spiridonov L.N., Komisarova L.N. Phase equilibria in the  $HfO_2$ - $Dy_2O_3$  system. *Izv. AN SSSR. Neorgan. Materialy* [News of the USSR Academy of Sciences. Non-organic materials], 1982;8(10):1878-1882.
28. Mahmudov F.A., Shaimardanov E.N., Kabgov H.B. Preparation and properties of nanostructured dysprosium oxides. *Dokl. AN Rep. Tadjikistan* [Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan], 2013;56(2):130-134.
29. Panneerselvam G. et al. Thermophysical measurements on dysprosium and gadolinium titanates. *J. Nucl. Mater.* 2004;327:220-225.
30. Jung S., Kim S., Lee S. Studies of the synthesis and sintering of  $Dy_2TiO_5$  obtained chemically on a polymer carrier. *J. Nucl. Mater.* 2006;354:137-142.
31. Lyashenko L.P., Shcherbakova L.G., Kolbanov I.V., Knerelman E.I., Davydova G.I. Mechanism of structure formation of samarium and holmium titanates obtained from mechano-activated oxides. *Inorg. Mater.* 2007;43(1):46-54.
32. Chernyshov V.M., Ryakhovskikh V.I., Poslavsky A.O., Ponomarenko V.B., Makovsky V.D., Osadchy A.I.; Lunin G.L., Biryukov G.I., Vasilchenko I.N. *Reguliruyushchiy sterzhen yadernogo reaktora* [The regulating rod of the nuclear reactor]. Patent RU, no. 2077741, 1997.
33. Safranyak-Visa I., Hilzer B., Talik E., Pietrashko A., Malich B. Ferroelectric powders of perovskite na-n obtained by mechanochemical synthesis. *Process. Adj. Ceramics*. 2010;4(3):99-106.

Поступила 23.01.2025; принята к публикации 06.02.2025; опубликована 30.06.2025  
Submitted 23/01/2025; revised 06/02/2025; published 30/06/2025

**Шарипзянова Гюзель Харрясовна** – кандидат технических наук, проректор по учебной работе, Московский политехнический университет, Москва, Россия.  
Email: guzel@mtw.ru. ORCID 0000-0002-0863-7490

**Guzel Kh. Sharipzyanova** – PhD, Vice-Rector for Academic Affairs, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia.  
Email: guzel@mtw.ru. ORCID 0000-0002-0863-7490

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 549:54.055

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-78-87

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ШЛАКОВ СРЕДНЕУРАЛЬСКОГО  
МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО ЗАВОДА

Ерохин Ю.В., Козлов П.С., Захаров А.В., Ширяев П.Б., Леонова Л.В.

Институт геологии и геохимии имени академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** Среднеуральский медеплавильный завод является крупным производителем черновой меди, серной кислоты и суперфосфатных удобрений. За почти 100 лет работы на предприятии скопилось огромное количество шлаков, в том числе и медеплавильного производства. На данный момент завод занимается активной переработкой камнеподобных (литых) шлаков, выделяя из них сульфидный концентрат с благородными металлами. В результате дробления на предприятии формируются новые отвальные массы в виде пылевидного черного шлака. Для разработки технологии дальнейшей утилизации этих масс требуется детальная информация о минеральном составе шлаков. К сожалению, вещественный состав шлаков СУМЗа, полученный предыдущими исследователями, выглядит достаточно противоречивым и требует пересмотра. **Цель работы.** Изучение вещественного (минерального) состава шлаков Среднеуральского медеплавильного завода, полученных при проплавке медноколчеданных руд. **Используемые методы.** Химический состав шлака установлен на рентгенофлуоресцентном волновом спектрометре XRF 1800 фирмы Shimadzu, а состав минералов определен на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA LMS, S6123 с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments (ИГГ УрО РАН). На последнем приборе сделаны и фотографии минералов. **Новизна.** Рассмотрение вещественного состава шлаков проводилось с применением современной номенклатуры Комиссии по новым минералам Международной минералогической ассоциации и использованием методов классической минералогии. **Результат.** Нами рассмотрена и существенно дополнена минералогия литых шлаков Среднеуральского медеплавильного завода. Установлено, что они сложены фаялитом и железистым авгитом с присутствием магнетита, стекла и хромшпинелида (хромита и магнезиохромита). Сульфидная составляющая в основном представлена кубанитом и борнитом, реже идаитом, сфалеритом, галенитом и Zn-аналогом кубанита. Кроме того, отмечается арсениднотибиновая минерализация, сложенная брейтгауптитом, вестервельдитом, купростибитом и алларгентумом. Металлы и интерметаллиды, соответственно, представлены медью и аурикупридом. **Практическая значимость.** Изученные медные шлаки пускают в дополнительную переработку, так как они содержат большое количество сульфидов меди и цинка, а также примесь золота и серебра. Попутно из этих шлаков можно добывать магнетитовый концентрат, что позволит на 20% уменьшить объем отвалов. В целом пылевидные шлаки можно рассматривать как техногенную железную руду. К сожалению, технологии выделения железа из силикатов пока слишком затратные, но если учесть попутно выделяемые цинк, медь и другие элементы, то, возможно, это станет рентабельно.

**Ключевые слова:** фаялит, авгит, магнетит, сульфиды, минералогия, шлаки, Среднеуральский медеплавильный завод

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Правительства Свердловской области № 24-27-20061, <https://rscf.ru/project/24-27-20061/>

© Ерохин Ю.В., Козлов П.С., Захаров А.В., Ширяев П.Б., Леонова Л.В., 2025

**Для цитирования**

Вещественный состав шлаков Среднеуральского медеплавильного завода / Ерохин Ю.В., Козлов П.С., Захаров А.В., Ширяев П.Б., Леонова Л.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 78-87. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-78-87>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# MATERIAL COMPOSITION OF SLAG FROM THE SREDNEURALSCK COPPER SMELTER

Erokhin Yu.V., Kozlov P.S., Zakharov A.V., Shiryayev P.B., Leonova L.V.

Institute of Geology and Geochemistry, RAS Ural Branch, Yekaterinburg, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** The Sredneuralsk Copper Smelter is a major producer of black copper, sulfuric acid and superphosphate fertilizers. Over almost 100 years of operation, the plant has accumulated a huge amount of slag, including copper smelting production. At the moment, the plant is actively processing rock-like (cast) slags, extracting sulfide concentrate with precious metals from them. As a result of crushing, new waste masses are formed at the plant in the form of dusty black slag. Further utilization of these masses requires a detailed understanding of the mineral composition of the slags. Unfortunately, the material composition of the SUCS slags obtained by previous researchers looks quite contradictory and requires revision. **Objectives.** Study of the material (mineral) composition of slags from the Sredneuralsk copper smelter obtained during the smelting of copper-sulphide ores. **Methods Applied.** The chemical composition of the slag was determined using an XRF 1800 X-ray fluorescence wave spectrometer from Shimadzu, and the composition of the minerals was determined using a TESCAN MIRA LMS, S6123 scanning electron microscope with an INCA Energy 450 X-Max 80 energy dispersive device from Oxford Instruments (IGG UBr RAS). The latter device was also used to take photographs of the minerals. **Originality.** The examination of the material composition of slags was carried out using the modern nomenclature of the Commission on New Minerals of the International Mineralogical Association and using the methods of classical mineralogy. **Results.** We have examined and supplemented the mineralogy of cast slags of the Sredneuralsk copper smelter. It has been established that they are composed of fayalite and ferrous augite with the presence of magnetite, glass and chrome spinelide (chromite and magnesiochromite). The sulfide component is mainly represented by cubanite and bornite, less often by idaite, sphalerite, galena and Zn-analogue of cubanite. In addition, arsenide-stibnite mineralization is noted, composed of breithauptite, westerveldite, cuprostibite and allargentum. Metals and intermetallics are respectively represented by copper and auricupride. **Practical Relevance.** The studied copper slags are sent for additional processing, since they contain a large amount of copper and zinc sulfides, as well as an admixture of gold and silver. At the same time, magnetite concentrate can be extracted from these slags, which will reduce the volume of waste dumps by 20%. In general, dusty slags can be considered as man-made iron ore. Unfortunately, the technologies for extracting iron from silicates are still too expensive, but if to take into account the zinc, copper and other elements that are extracted along the way, then perhaps it will become profitable.

**Keywords:** fayalite, augite, magnetite, sulfides, mineralogy, slags, Sredneuralsk Copper Smelter

*The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation and the Government of the Sverdlovsk region No. 24-27-20061, <https://rscf.ru/project/24-27-20061/>*

## For citation

Erokhin Yu.V., Kozlov P.S., Zakharov A.V., Shiryayev P.B., Leonova L.V. Material Composition of Slag from the Sredneuralsk Copper Smelter. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 78-87. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-78-87>

## Введение

Среднеуральский медеплавильный завод (СУМЗ) расположен в Свердловской области и находится на северной окраине г. Ревда. Предприятие решили построить в 1931 году на базе рядом расположенного Дегтярского медноколчеданного месторождения, разработка которого началась в 1914 году. В 1937 году при заводе запустили обогатительную фабрику, а выплавка меди началась только спустя три года. В период Великой Отечественной войны завод работал с перерывами и с трудом (из-за несовершенства технологии плавки) смог выдать десятки тысяч тонн металла. В 1962 году был пущен обжиговой цех, благодаря которому снизились потери меди при плавке. Годом позже на предприятии

запустили сернокислотный цех, а в 1972 году – суперфосфатный цех.

В 1970-х годах завод подвергся масштабной реконструкции, из-за чего в 1980-х стал крупнейшим в СССР производителем меди (до 130 тыс. т в год), серной кислоты (940 тыс. т в год) и суперфосфатных удобрений (1 млн т в год). В начальный период современной России завод в два раза сократил выпуск продукции, но со временем восстановил свои объемы. На данный момент это одно из ведущих предприятий страны по выплавке черновой меди, а также по производству удобрений и серной кислоты [1].

В настоящее время медные шлаки активно утилизируются предприятием. В первую очередь из них выделяется медно-цинковый концентрат, который снова пускается в металлургический передел, а по-

путно извлекаются благородные металлы [2]. По предварительным оценкам в шлакоотвалах СУМЗа лежат 5,4 т золота и 103,7 т серебра [3]. К сожалению, получаемый при дроблении пылевидный шлак использовать особо некуда, в основном его пытаются применить в строительстве и поэтому объемы такого шлака нарастают. Ранее отмечалось, что к 2012 году на предприятии уже было накоплено около 10 млн т такого «технического песка» [4]. При этом с точки зрения экологии пылевидный шлак является более проблемным в сравнении с массивными камнеподобными (литыми) шлаками, так как мелкие частицы легко переносятся воздушными массами и активно вступают в реакцию с окружающей средой. На данном этапе основную часть «технического песка» складывают в выработки, то есть засыпают все карьеры, которые находятся вблизи предприятия. Кроме того, проводятся опыты с использованием данного песка в качестве подкормки для растений [5].

Вещественный состав медеплавильных шлаков СУМЗа достаточно активно изучался в последнее время, в том числе и нами. Первые сведения по минеральному составу данных шлаков были приведены в 2002 году [6]. Этими исследователями были установлены фаялит (80 об.%), магнетит (10 об.%), стекло, медь и сульфиды (борнит, ковеллин). В 2007 году вышла монография А.Б. Макарова [7], где, среди прочего, упоминался минеральный состав шлаков СУМЗа: кварц – 24%, магнетит – 21%, фаялит – 20%, пирротин – 12%, виллемит – 10%, феррит цинка – 10%, куприт – 1%, шпинель – 1%, псевдоволастонит – 1%. В 2013 году вышла коллективная монография по техногенным образованиям Урала [3] и там тоже упоминался минеральный состав шлаков Среднеуральского завода. Были приведены следующие минералы: фаялит, магнетит, феррит цинка, куприт, тефорит, делафоссит и сульфиды меди и железа, а также воластонит и медь.

Нами в шлаках описывался фаялит из центральных частей шлакоблоков [8], магнетитовые настывы [9] и необычный кварц-купритовый шлак [10]. Были выделены следующие минералы: фаялит, магнетит, пироксен (диопсид, авгит), медь, кварц, куприт, сульфиды Cu-Fe-Zn, силикат Ni-Mg, фазы Cu-Cr, Cu-Fe, Cu-Sn-Fe и стекла (в каждом случае разного состава). При этом нами рассматривались отдельные интересные минералогические сюжеты, и детального изучения шлаков Среднеуральского медеплавильного завода не проводилось.

Для сравнения необходимо привести литературные данные по пылевидным шлакам, которые получились при дроблении литых шлаков и вроде как должны быть идентичны с ними по составу. По сведениям самого предприятия минеральный состав пылевидного шлака следующий: фаялит – 49%, кварц – 20%, магнетит – 10%, феррит цинка – 8%, пирротин – 1%, борнит – 0,5%, халькопирит – 0,4%, ковеллин – 0,05%, прочие – 11,05% [11]. При этом, по данным

преподавателей УГГУ, пылевидные шлаки состоят из фаялита, магнетита, сульфидов, хромшпинелида, кварца и апатита [12]. По сведениям сотрудников ИГГ УрО РАН, «технический песок» сложен фаялитом, магнетитом, пироксеном (ферросилит-энстатит, реже авгит, пижонит и геденбергит), вюститом, гематитом, штейном (сульфидами – галенитом, пиритом и халькопиритом), шпейзой (интерметаллиды на основе сурьмы или мышьяка), стеклом и кварцем [13]. В то же время уже объединенный коллектив ученых из ИМин УрО РАН, ИГГ УрО РАН и ИМет УрО РАН привел немного другой минеральный состав песков, по их мнению, они состоят из фаялита, форстерита, магнетита, феррита цинка и меди, диопсида, цинкита и сфалерита [14].

Таким образом, мы вынуждены констатировать, что различные исследователи привели противоречивые данные по вещественному составу шлаков СУМЗа. Настоящая работа направлена на изучение и уточнение минерального состава медных шлаков Среднеуральского завода.

### Отбор образцов шлака и методы исследования

Медные шлаки были отобраны нами в разное время в течение 2010-х годов. Образцы (всего отобрано около 50 шт.) отбирались в пределах заводских шлакоотвалов, расположенных на северной и западной окраинах предприятия. Исследовались крупнообломочный материал и огромные блоки шлаков размером до 1-2 м. Отобранные образцы шлаков (размер от первых сантиметров до 15-20 см) имеют черный цвет, часто с красноватой патиной. Пористость минимальная, обычно не более 1-2 об.%. В некоторых образцах встречается медь. Местами на шлаках отмечается развитие вторичной минерализации: медная зелень или синий халькантит (медный купорос). Несмотря на разнообразие образцов, их внешний вид достаточно однородный, различается только зернистость шлака.

Все аналитические исследования были проведены в Институте геологии и геохимии УрО РАН (г. Екатеринбург). Химический состав шлака установлен на рентгено-флуоресцентном волновом спектрометре XRF 1800 фирмы Shimadzu (аналитик Л.А. Татаринова). Химический состав минералов и их фотографии сделаны с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA LMS, S6123 с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments (аналитик Л.В. Леонова). Для изучения использовались полированные петрографические шлифы, вырезанные из кусочков шлака.

### Полученные результаты

В результате исследований оказалось, что отобранные нами шлаки сложены оливин-пироксеновым агрегатом со значительным содержанием магнетита, хромшпинелидов и присутствием различных сульфидов, арсенидов и стибнидов, а также стекла, меди и



интерметаллида меди и золота. Химический состав шлака следующий (в мас.%):  $\text{SiO}_2$  – 32,18;  $\text{TiO}_2$  – 0,27;  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  – 0,57;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 5,85;  $\text{FeO}_{\text{общ}}$  – 48,07;  $\text{MgO}$  – 1,25;  $\text{MnO}$  – 0,08;  $\text{CuO}$  – 0,53;  $\text{ZnO}$  – 4,81;  $\text{CaO}$  – 4,15;  $\text{K}_2\text{O}$  – 0,71;  $\text{Na}_2\text{O}$  – 0,63;  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 0,17;  $\text{SO}_3$  – 1,62; сумма – 100,89.

**Фаялит** ( $\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$ ) является главным минералом в шлаке (около 45-50 об.%) и часто образует практически мономинеральные скопления. Оливин слагает игольчатые скелетные кристаллы (рис. 1, 2) размером от 20 мкм до первых сантиметров по удлинению. По данным химического состава (табл. 1) минерал относится к фаялиту и содержит примеси  $\text{ZnO}$  (до 3,1 мас.%),  $\text{MgO}$  (до 2,7 мас.%),  $\text{CaO}$  (до 1,4 мас.%),  $\text{CuO}$  (до 0,6 мас.%) и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (до 0,5 мас.%), то есть рассчитываются миналы форстерита (до 7%), виллемита (до 4%) и кальциооливина (до 2,5%). На петрографической диаграмме оливина анализы попадают в поля феррогортонолита и собственно фаялита. Интересно, что ранее описанный нами фаялит из центральных частей шлакоблоков содержит еще больше  $\text{ZnO}$  в пределах 3-4 мас.% [8].

**Авгит** ( $(\text{Ca,Mg,Fe})_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$ ) является второстепенным минералом в шлаке (около 15-20 об.%) и встречается в интерстициях между кристаллами фаялита (см. рис. 1). Пироксен образует мелкие короткопризматические индивиды и их агрегаты размером не более 40 мкм. Полученные анализы пироксена попадают в поле авгита, недалеко от области развития геденбергита. Август содержит примеси  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (до 4,5 мас.%),  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (до 2,8 мас.%),  $\text{MgO}$  (до 2,6 мас.%) и  $\text{ZnO}$  (до 1,8 мас.%) (см. табл. 1). Пироксен является

кальциодефицитным и, по всей видимости, часть железа замещает вакансии в позиции кальция. Изученный авгит немного напоминает ранее описанный нами пироксен из магнетитовых настывлей СУМЗа [9].

**Магнетит** ( $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$ ) является второстепенным минералом в шлаке (около 20 об.%) и образует изометричные округлые или хорошо окристаллизованные зерна (рис. 1), а также скелетные кристаллы (см. рис. 2). Кроме того, встречается в виде кайм мощностью до 20 мкм, вокруг зерен хромшпинелида (рис. 3). Размер индивидов магнетита достигает 0,5 мм. Химический состав зерен (табл. 2, анализы 1-2) достаточно однородный и отвечает глиноземистому магнетиту. Из значимых примесей в минерале отмечаются алюминий ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  до 5,5 мас.%), цинк ( $\text{ZnO}$  до 2,7 мас.%), титан ( $\text{TiO}_2$  до 1,2 мас.%), хром ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$  до 1,8 мас.%) и кремний ( $\text{SiO}_2$  до 1,0 мас.%). Пересчет на кристаллохимические формулы показывает присутствие миналов герцинита (до 12%) и франклинита (до 8%). При этом магнетит из новообразованных кайм по зернам хромшпинелида резко отличается по химическому составу (табл. 2, анализы 3-4), в первую очередь повышенной хромистостью с содержанием до 20,2 мас.%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Кроме того, в шпинелиде нарастает количество примесей алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  до 8,4 мас.%) и цинка ( $\text{ZnO}$  до 4,3 мас.%). Кристаллохимический пересчет показывает присутствие миналов хромита (до 30%), герцинита (до 18%) и франклинита (до 12%), то есть на долю самого магнетита приходится около 40%. Похожие значения и у ранее описанного нами магнетита из центральных частей шлакоблоков [8].

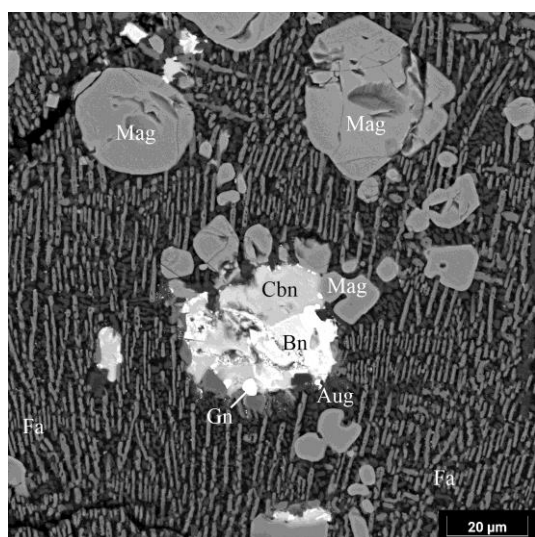


Рис. 1. Внешний вид медного шлака: Fa – фаялит; Aug – авгит; Mag – магнетит; Gn – галенит; Cbn – кубанит; Bn – борнит. Фото в BSE-режиме, СЭМ TESCAN MIRA LMS, S6123

Fig. 1. Appearance of copper slag: Fa as fayalite; Aug as augite; Mag as magnetite; Gn as galena; Cbn as cubanite; Bn as bornite. BSE-photo, SEM TESCAN MIRA LMS, S6123

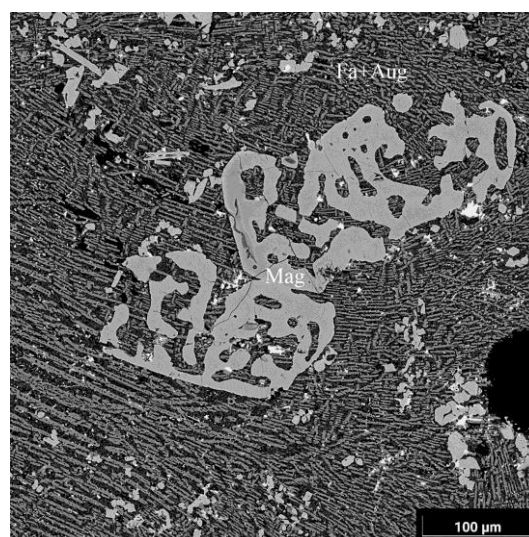


Рис. 2. Скелетные кристаллы магнетита в матрице шлака: Mag – Магнетит; Fa+Aug – агрегат фаялита с авгитом. Фото в BSE-режиме, СЭМ TESCAN MIRA LMS, S6123

Fig. 2. Skeletal crystals of magnetite in a slag matrix: Mag as magnetite; Fa+Aug as aggregate of fayalite with augite. BSE-photo, SEM TESCAN MIRA LMS, S6123

Таблица 1. Химический состав фаялита и авгита, мас. %

Table 1. Chemical composition of fayalite and augite, wt. %

Номер анализа	SiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CuO	ZnO	MgO	CaO	Сумма
Фаялит									
1	29,89	-	-	66,59	-	1,37	1,37	0,78	100
2	29,49	-	0,48	64,17	0,30	2,16	2,19	1,21	100
3	29,86	-	0,30	62,78	0,36	2,65	2,61	1,44	100
4	29,44	-	0,49	62,96	0,60	3,08	2,74	0,69	100
Авгит									
5	43,43	2,79	4,50	28,69	-	1,05	1,90	17,64	100
6	43,55	2,45	4,40	28,13	-	1,30	1,79	18,38	100
7	44,53	2,14	3,45	28,19	-	1,58	1,95	18,16	100
8	45,94	1,37	3,15	26,98	-	1,82	2,62	18,12	100
Кристаллохимические формулы в пересчете на количество атомов кислорода									
1	(Fe <sub>1,87</sub> Mg <sub>0,07</sub> Zn <sub>0,03</sub> Ca <sub>0,03</sub> ) <sub>2,00</sub> [Si <sub>1,00</sub> O <sub>4</sub> ]								
2	(Fe <sub>1,79</sub> Mg <sub>0,11</sub> Zn <sub>0,05</sub> Ca <sub>0,04</sub> Cu <sub>0,01</sub> ) <sub>2,00</sub> [(Si <sub>0,98</sub> Al <sub>0,02</sub> ) <sub>1,00</sub> O <sub>4</sub> ]								
3	(Fe <sub>1,74</sub> Mg <sub>0,13</sub> Zn <sub>0,07</sub> Ca <sub>0,05</sub> Cu <sub>0,01</sub> ) <sub>2,00</sub> [(Si <sub>0,99</sub> Al <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub> O <sub>4</sub> ]								
4	(Fe <sub>1,75</sub> Mg <sub>0,14</sub> Zn <sub>0,08</sub> Ca <sub>0,07</sub> Cu <sub>0,01</sub> ) <sub>2,00</sub> [(Si <sub>0,98</sub> Al <sub>0,02</sub> ) <sub>1,00</sub> O <sub>4</sub> ]								
5	(Ca <sub>0,78</sub> Fe <sub>0,22</sub> ) <sub>1,00</sub> (Fe <sub>0,76</sub> Mg <sub>0,12</sub> Cr <sub>0,09</sub> Zn <sub>0,03</sub> ) <sub>1,00</sub> [(Si <sub>1,78</sub> Al <sub>0,22</sub> ) <sub>2,00</sub> O <sub>6</sub> ]								
6	(Ca <sub>0,81</sub> Fe <sub>0,19</sub> ) <sub>1,00</sub> (Fe <sub>0,77</sub> Mg <sub>0,11</sub> Cr <sub>0,08</sub> Zn <sub>0,04</sub> ) <sub>1,00</sub> [(Si <sub>1,79</sub> Al <sub>0,21</sub> ) <sub>2,00</sub> O <sub>6</sub> ]								
7	(Ca <sub>0,80</sub> Fe <sub>0,20</sub> ) <sub>1,00</sub> (Fe <sub>0,76</sub> Mg <sub>0,12</sub> Cr <sub>0,07</sub> Zn <sub>0,05</sub> ) <sub>1,00</sub> [(Si <sub>1,83</sub> Al <sub>0,17</sub> ) <sub>2,00</sub> O <sub>6</sub> ]								
8	(Ca <sub>0,79</sub> Fe <sub>0,21</sub> ) <sub>1,00</sub> (Fe <sub>0,75</sub> Mg <sub>0,16</sub> Zn <sub>0,06</sub> Cr <sub>0,04</sub> ) <sub>1,01</sub> [(Si <sub>1,84</sub> Al <sub>0,15</sub> ) <sub>1,99</sub> O <sub>6</sub> ]								

Таблица 2. Химический состав шпинелидов, мас. %

Table 2. Chemical composition of spinelides, wt. %

Номер анализа	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	ZnO	MgO	CaO	Сумма
Магнетит										
1	0,78	1,30	5,49	-	60,37	28,86	2,74	-	0,19	99,73
2	0,98	1,18	5,29	1,11	59,33	29,24	2,73	-	-	99,86
3	0,63	0,25	8,42	10,85	47,03	28,69	2,78	1,19	-	99,84
4	0,44	1,19	6,24	20,22	39,40	27,25	4,32	0,74	0,28	100,08
Хромит										
5	1,43	0,41	6,03	47,24	13,25	23,71	6,08	2,08	0,20	100,43
6	1,21	-	7,21	57,54	4,57	18,68	5,08	6,28	-	100,57
Магнезиохромит										
7	0,55	-	7,73	63,15	1,86	11,57	3,31	12,12	-	100,29
8	0,48	-	8,15	66,14	1,75	2,82	-	20,94	-	99,28
Кристаллохимические формулы в пересчете на 4 атома кислорода										
1	(Fe <sub>0,91</sub> Zn <sub>0,08</sub> Ca <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub> (Fe <sub>1,69</sub> Al <sub>0,24</sub> Ti <sub>0,04</sub> Si <sub>0,03</sub> ) <sub>2,00</sub> O <sub>4</sub>									
2	(Fe <sub>0,92</sub> Zn <sub>0,08</sub> ) <sub>1,00</sub> (Fe <sub>1,67</sub> Al <sub>0,23</sub> Si <sub>0,04</sub> Cr <sub>0,03</sub> Ti <sub>0,03</sub> ) <sub>2,00</sub> O <sub>4</sub>									
3	(Fe <sub>0,87</sub> Zn <sub>0,08</sub> Mg <sub>0,06</sub> ) <sub>1,01</sub> (Fe <sub>1,29</sub> Al <sub>0,36</sub> Cr <sub>0,31</sub> Si <sub>0,02</sub> Ti <sub>0,01</sub> ) <sub>1,99</sub> O <sub>4</sub>									
4	(Fe <sub>0,84</sub> Zn <sub>0,12</sub> Mg <sub>0,04</sub> Ca <sub>0,01</sub> ) <sub>1,01</sub> (Fe <sub>1,08</sub> Cr <sub>0,59</sub> Al <sub>0,27</sub> Ti <sub>0,03</sub> Si <sub>0,02</sub> ) <sub>1,99</sub> O <sub>4</sub>									
5	(Fe <sub>0,71</sub> Zn <sub>0,16</sub> Mg <sub>0,11</sub> Ca <sub>0,01</sub> ) <sub>0,99</sub> (Cr <sub>1,33</sub> Fe <sub>0,36</sub> Al <sub>0,26</sub> Si <sub>0,05</sub> Ti <sub>0,01</sub> ) <sub>2,01</sub> O <sub>4</sub>									
6	(Fe <sub>0,54</sub> Mg <sub>0,32</sub> Zn <sub>0,13</sub> ) <sub>0,99</sub> (Cr <sub>1,56</sub> Al <sub>0,29</sub> Fe <sub>0,12</sub> Si <sub>0,04</sub> ) <sub>2,01</sub> O <sub>4</sub>									
7	(Mg <sub>0,60</sub> Fe <sub>0,37</sub> Zn <sub>0,08</sub> ) <sub>0,99</sub> (Cr <sub>1,63</sub> Al <sub>0,30</sub> Fe <sub>0,05</sub> Si <sub>0,02</sub> ) <sub>2,00</sub> O <sub>4</sub>									
8	(Mg <sub>0,93</sub> Fe <sub>0,07</sub> ) <sub>0,99</sub> (Cr <sub>1,64</sub> Al <sub>0,30</sub> Fe <sub>0,04</sub> Si <sub>0,02</sub> ) <sub>2,00</sub> O <sub>4</sub>									

**Хромит** (Fe<sup>2+</sup>Cr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) в шлаке встречается редко, он образует промежуточные зоны в зернах хромшпинелида между каймами хромистого магнетита и основной матрицей магнезиохромита (см. **рис. 3**). Мощность зоны составляет от 20 до 30 мкм. Химический состав хромита изменчивый (см. **табл. 2**, анализы 5-6). Он становится более хромистым и магнезиальным при приближении к магнезиохромиту (анализ 6) и более железистым и цинкистым – к кайме магнетита (анализ 5). Из примесей в хромите отмечаются алюминий (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 7,2 мас.%), магний (MgO до 6,3

мас.%), цинк (ZnO до 6,1 мас.%), кремний (SiO<sub>2</sub> до 1,4 мас.%) и титан (TiO<sub>2</sub> до 0,4 мас.%).

**Магнезиохромит** (MgCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) составляет центральную часть зерен хромшпинелида (см. **рис. 3**), которые достигают относительно крупных размеров – до 1 мм в диаметре. Химический состав магнезиохромита, как и у хромита, тоже изменчивый (см. **табл. 2**, анализы 7-8). В центральной части зерен хромшпинелид более магнезиальный и не содержит цинк (анализ 8), а при приближении к зоне хромита в минерале появляется цинк и резко нарастает железо (анализ 7). Из приме-

сей в магнезиохромите отмечаются железо (FeO до 11,6 мас.%), алюминий ( $Al_2O_3$  до 8,2 мас.%), цинк (ZnO до 3,3 мас.%) и кремний ( $SiO_2$  до 0,6 мас.%).

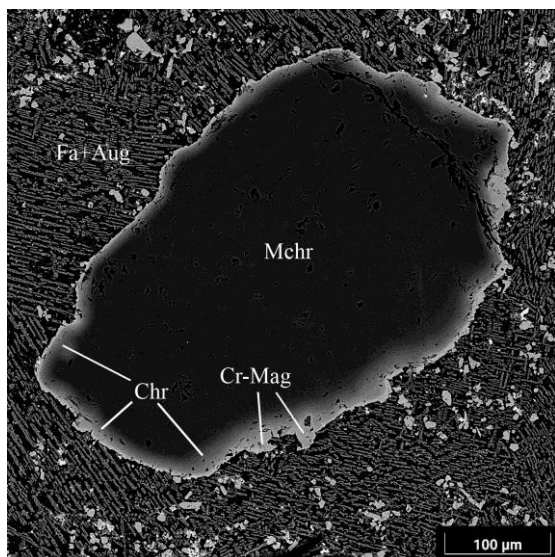


Рис. 3. Хромшпинелид в матрице шлака: Chr – хромит; Mchr – магнезиохромит; Cr-Mag – Cr-магнетит; Fa+Aug – агрегат фаялита с авгитом. Фото в BSE-режиме, СЭМ TESCAN MIRA LMS, S6123

Fig. 3. Chromspinelide in the slag matrix: Chr as Chromite; Mchr as magnesiochromite; Cr-Mag as Cr-magnetite; Fa+Aug as fayalite aggregate with augite. BSE-photo, SEM TESCAN MIRA LMS, S6123

**Стекло** в шлаке встречается редко, его количество не превышает 5 об.%. Оно выполняет интерстиции между кристаллами фаялита и индивидами пироксена. Размер его выделений не превышает 10 мкм. Представительный состав этого стекла следующий (в мас.%):  $SiO_2$  – 42,51;  $Al_2O_3$  – 6,73; FeO – 33,59; ZnO – 1,36; BaO – 1,42; MgO – 1,79; CaO – 10,45;  $Na_2O$  – 1,18;  $K_2O$  – 0,96. На диаграмме TAS этот анализ попадает в поле умеренно-щелочных пикробазальтов, то есть относится к субщелочным ультраосновным породам. Вокруг редких обломков кварца тоже отмечается стекло, которое облекает кремнезем в виде слоев мощностью до 100 мкм. Представительный состав этого стекла следующий (в мас.%):  $SiO_2$  – 59,49;  $Al_2O_3$  – 11,65; FeO – 15,97; ZnO – 1,06; BaO – 1,30; MgO – 0,77; CaO – 3,19;  $Na_2O$  – 2,91;  $K_2O$  – 3,66. На диаграмме TAS этот анализ попадает в поле трахиандезитов, то есть относится к субщелочным средним породам.

**Сульфиды Cu-Fe** являются главными минералами серы в шлаке и встречаются по всей матрице породы в виде округлых выделений размером до 1-2 мм в диаметре. Они часто содержат обильные включения магнетита и разнообразных халькогенидов. Судя по полученным составам, преобладают две фазы суль-

фидов (в мас.%): S – 25-27; Fe – 13-18; Cu – 57-61 и S – 33-35; Fe – 38-41; Cu – 22-25. Первый сульфид достаточно близок к *борниту* ( $Cu_5FeS_4$  – S – 25,6; Fe – 11,1; Cu – 63,3), а второй хорошо коррелируется с *кубанитом* ( $CuFe_2S_3$  – S – 35,4; Fe – 41,2; Cu – 23,4). Интересно, что местами в мелких сульфидных шариках вместо борнита образуется фаза (S – 30,7; Fe – 17,1; Cu – 52,2), близкая по составу к *идауну* –  $Cu_3FeS_4$  (S – 34,2; Fe – 14,9; Cu – 50,9). Похожий сульфид описывался нами ранее в образцах из центральных частей шлакоблоков [8].

**Сульфиды Zn-Fe** в шлаке встречаются редко и обычно наблюдаются отдельно от шариков борнит-кубанитового состава. *Сфалерит* образует ксеноморфные выделения среди оливин-пироксенового агрегата, размером до 50 мкм. По составу сульфид однородный (в мас.%): S – 34,07; Fe – 24,55; Zn – 39,61; Cu – 1,77, что в пересчете дает следующую кристаллохимическую формулу:  $(Zn_{0,57}Fe_{0,41}Cu_{0,03})_{1,01}S_{0,99}$ , то есть является сильно-железистой разновидностью сфалерита – марматитом. Другой сульфид Zn-Fe слагает однофазные шарики размером до 500 мкм. По составу он тоже однородный (в мас.%): S – 35,29; Fe – 37,57; Zn – 15,27; Cu – 11,87, и, по всей видимости, является *цинковым аналогом кубанита* с формулой  $(Zn_{0,64}Cu_{0,51})_{1,15}Fe_{1,84}S_{3,01}$ .

**Галенит** (PbS) образует отдельные включения в сульфидных шариках (см. **рис. 1**), а также каплевидную, ориентированную (эвтектическую) вкрапленность на границе сульфидов и силикатной матрицы шлака (**рис. 4**). Размер зерен сульфида не более 20 мкм. Отдельные зерна галенита по составу достаточно чистые, из примесей отмечаются только медь (до 3,0 мас.%) и железо (до 2,5 мас.%). Ориентированная вкрапленность галенита содержит больше примесей, в ней установлены Cu (до 4,4 мас.%), Fe (до 1,2 мас.%), Te (до 0,9 мас.%) и Ni (до 0,6 мас.%). Это объясняется тем, что именно с таким каплевидным галенитом встречаются скопления арсенидов и стибнидов (так называемая шпейза).

**Брейтгауптит** (NiSb) является главным минералом в арсенидно-стибнидных скоплениях. Он образует вытянутые и неправильной формы зерна размером до 50 мкм (см. **рис. 4**). По химическому составу зерна однородные и уверенно определяются как брейтгауптит (**табл. 3**, анализы 1-2). В качестве примесей в стибниде никеля отмечаются As (до 4,9 мас.%), Fe (до 2,2 мас.%), Cu (до 2,3 мас.%) и Co (до 1,8 мас.%).

**Вестервельдит** (FeAs), так же как и брейтгауптит, является главным минералом в арсенидно-стибнидных скоплениях. Он образует удлиненные зерна размером до 30 мкм и часто контактирует с брейтгауптитом (см. **рис. 4**). По химическому составу зерна однородные и уверенно определяются как вестервельдит (см. **табл. 3**, анализы 3-4). Из примесей в арсениде железа отмечаются Ni (до 6,7 мас.%), Co (до 6,0 мас.%), Sb (до 2,0 мас.%) и Cu (до 1,0 мас.%).



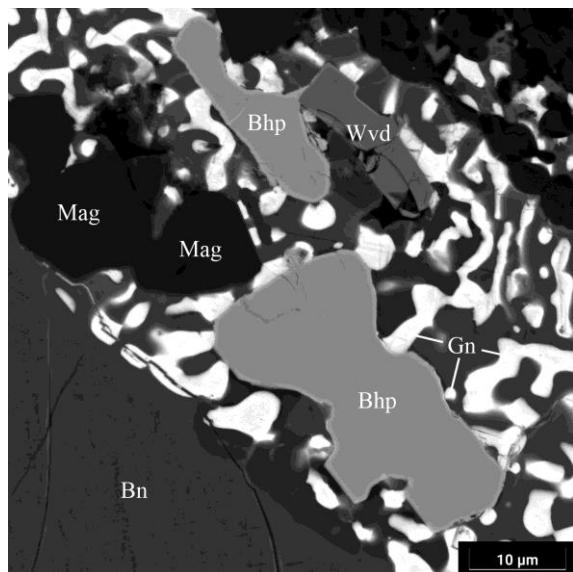


Рис. 4. Арсенидно-стибнидная минерализация:

Bhp – Брейтгауптит; Bn – борнит;  
Gn – галенит; Wvd – вестервельдит;  
Mag – магнетит. Фото в BSE-режиме,  
СЭМ TESCAN MIRA LMS, S6123

Fig. 4. Arsenide-stibnite mineralization:

Bhp as Breithauptite; Bn as bornite; Gn as galena;  
Wvd as westerveldite; Mag as magnetite.  
BSE-photo, SEM TESCAN MIRA LMS, S6123

**Купростибит** ( $\text{Cu}_2\text{Sb}$ ) встречается редко в зоне каплевидного галенита и отдельно от брейтгауптита и вестервельдита, образуя единичные изометричные зерна размером до 10 мкм. Обычно наблюдается на границе галенита и борнита. По химическому составу минерал определяется как купростибит (см. табл. 3, анализы 5-6). В качестве примесей в стибниде меди отмечаются As (до 6,1 мас.%), Fe (до 5,6 мас.%), Ag (до 1,5 мас.%), Ni (до 0,5 мас.%) и Co (до 0,1 мас.%).

**Алларгентум** ( $\text{Ag}_6\text{Sb}$ ) образует тонкие прожилки мощностью до 1 мкм в брейтгауптите и мелкие изометричные зерна размером до 5 мкм, вокруг стибнида никеля (см. рис. 4). По своему составу минерал (см. табл. 3, анализы 7-8) близок к алларгентуму  $\text{Ag}_6\text{Sb}$  (Sb – 15,8%; Ag – 84,2%) [15]. В качестве примесей в стибниде серебра отмечаются Au (до 3,9 мас.%), Fe (до 2,2 мас.%), Cu (до 1,6 мас.%), As (до 0,8 мас.%) и Ni (до 0,2 мас.%).

**Аурикуприд** ( $\text{Cu}_3\text{Au}$ ) образует мелкие зерна размером до 5 мкм в срастании с брейтгауптитом. По составу минерал (Cu 47,9%; Au 52,1%) хорошо соответствует аурикуприду  $\text{Cu}_3\text{Au}$  (Cu 49,2%; Au 50,8%) [16]. Каких-либо примесей в интерметаллиде не отмечается.

**Медь** (Cu) образует мелкие шарики размером до 50 мкм по всей матрице шлака. Металл часто характеризуется включениями магнетита. По составу медь отличается чистотой и содержит небольшую примесь Fe (до 0,9 мас.%).

Таблица 3. Химический состав стибнидов и арсенидов, мас. %

Table 3. Chemical composition of stibnides and arsenides, wt. %

Номер анализа	Fe	Co	Ni	Cu	As	Sb	Ag	Au	Сумма
Брейтгауптит									
1	2,24	1,76	27,36	2,13	4,68	61,83	-	-	100
2	2,18	1,70	27,75	2,25	4,87	61,25	-	-	100
Вестервельдит									
3	29,56	5,45	6,72	0,91	55,40	1,96	-	-	100
4	29,22	6,03	6,53	1,03	55,59	1,60	-	-	100
Купростибит									
5	5,13	-	0,49	45,68	5,90	41,33	1,47	-	100
6	5,58	0,14	0,52	43,91	6,14	41,88	1,26	-	100
Алларгентум									
7	2,11	-	0,17	1,64	0,78	15,35	77,79	2,16	100
8	2,23	-	0,23	1,53	0,81	15,29	75,99	3,92	100
Кристаллохимические формулы в пересчете на количество атомов									
1	$(\text{Ni}_{0,82}\text{Fe}_{0,07}\text{Cu}_{0,06}\text{Co}_{0,05})_{1,00}(\text{Sb}_{0,89}\text{As}_{0,11})_{1,00}$								
2	$(\text{Ni}_{0,83}\text{Fe}_{0,07}\text{Cu}_{0,06}\text{Co}_{0,05})_{1,01}(\text{Sb}_{0,88}\text{As}_{0,11})_{0,99}$								
3	$(\text{Fe}_{0,71}\text{Ni}_{0,15}\text{Co}_{0,12}\text{Cu}_{0,02})_{1,00}(\text{As}_{0,98}\text{Sb}_{0,02})_{1,00}$								
4	$(\text{Fe}_{0,69}\text{Ni}_{0,15}\text{Co}_{0,14}\text{Cu}_{0,02})_{1,00}(\text{As}_{0,98}\text{Sb}_{0,02})_{1,00}$								
5	$(\text{Cu}_{1,73}\text{Fe}_{0,22}\text{Ag}_{0,03}\text{Ni}_{0,02})_{2,00}(\text{Sb}_{0,81}\text{As}_{0,19})_{1,00}$								
6	$(\text{Cu}_{1,70}\text{Fe}_{0,24}\text{Ag}_{0,03}\text{Ni}_{0,02}\text{Co}_{0,01})_{2,00}(\text{Sb}_{0,80}\text{As}_{0,20})_{1,00}$								
7	$(\text{Ag}_{5,41}\text{Fe}_{0,28}\text{Cu}_{0,19}\text{Au}_{0,08}\text{Ni}_{0,02})_{5,98}(\text{Sb}_{0,94}\text{As}_{0,08})_{1,02}$								
8	$(\text{Ag}_{5,31}\text{Fe}_{0,30}\text{Cu}_{0,18}\text{Au}_{0,15}\text{Ni}_{0,03})_{5,97}(\text{Sb}_{0,95}\text{As}_{0,08})_{1,03}$								



### Обсуждение полученных результатов

В результате проведенного нами исследования минеральный состав черных шлаков Среднеуральского медеплавильного завода выглядит следующим образом. Силикатная матрица породы сложена фаялитом и железистым авгитом с присутствием стекла. Окислы представлены магнетитом (в большом количестве), хромитом и магнезиохромитом. Из сульфидов установлены кубанит и борнит (главные фазы), реже идаит, сфалерит, галенит и Zn-аналог кубанита. Арсенидно-стибнидная минерализация образована ассоциацией брейтгауптита, вестервельдита, купростибита и алларгентума. Металлы и интерметаллиды представлены медью и аурикупридом. Кварц присутствует только как обломочный и реликтовый минерал, то есть он не относится к ассоциации медного шлака.

Выявленная минерализация достаточно сильно отличается от ранее приведенной минералогии литых и пылевидных шлаков Среднеуральского завода (см. введение). Нашими данными убедительно доказывается, что никаких находок виллемита, цинкита и феррита цинка в шлаках СУМЗ<sub>а</sub> быть не может, так как весь цинк входит в виде изоморфного компонента в фаялит, стекло и шпинелиды (главным образом, в магнетит) и, следовательно, самостоятельных фаз цинк не образует, за исключением сульфидов. Находки гематита и вюститита также выглядят очень сомнительными, так как в шлаке надежно фиксируется магнетит. Предельно окисленное железо (гематит) и закисное (вюстит) совместно с полуокисленным железом (магнетитом) встречаться в одной системе не могут. В принципе гематит, как вторичный минерал, может заместить первичный магнетит, но к парагенезису шлака он в этом случае не имеет отношения. К этому же относятся упоминания об тенорите и делафоссите. Это гипергенные минералы меди и образуются они путем замещения первичного субстрата.

Отдельно можно отметить вопрос пироксенов и пироксеноидов. Ранее выделяемые волластонит и псевдоволластонит в медных шлаках не встречаются, они, а точнее именно высокотемпературный псевдоволластонит, характерны для шлаков производства чугуна и железа. Упоминаемые пироксены типа ферросилит-энстатит типичны для метеоритов и в шлаках достоверно пока не отмечались. Пижонит и геденбергит в присутствии авгита кристаллизуются не могут, так как эти пироксены близки по составу и им для образования требуются одни и те же вещества.

Сульфидная минерализация предыдущими исследователями выделялась достаточно обширной, поэтому неудивительно, что какая-то их часть минералов совпала с выделенными нами фазами. При этом такие сульфиды, как пирит и пирротин, вообще не встречаются в медных шлаках, вместо них обычно кристаллизуется троилит, а халькопирит и ковеллин отмечаются крайне редко. Причем последний суль-

фид может образоваться как гипергенный минерал по первичным халькогенидам.

Почему в медных шлаках СУМЗ<sub>а</sub> получилась такая «разнообразная» минералогия? К сожалению, их изучение началось в домикрозондовую эпоху исследования вещества, а выделение минералов ранее проводилось на основании минералогического и рентгенофазового анализов. Первый метод заключается в определении минералов по внешнему виду и является крайне сомнительным, так как в этом случае всё зависит от квалификации минералога. К тому же внешний вид минералов очень изменчив и визуальное определение нуждается в дополнительных инструментальных исследованиях. Рентгенофазовый метод хорошо работает при определении одного или нескольких минералов. В случае со шлаками СУМЗ<sub>а</sub> мы имеем практически двадцать минеральных фаз, рентгеновские отражения которых будут накладываться друг на друга, и интерпретировать их крайне затруднительно, поэтому в случае использования этого метода достоверно определяются только главные минералы.

Медные шлаки Среднеуральского завода подлежат активной переработке. Большое количество сульфидов и арсенидов-стибнидов, а также связанных с ними благородных металлов можно выделять с помощью флотации. Собственно говоря, предприятие именно этим и занимается, в итоге получая не только сульфидный концентрат с золотом и серебром, но и пылевидный шлак. К сожалению, извлечение сульфидного концентрата составляет не более 60% [6], то есть около 40% халькогенидов и благородных металлов уходит в пылевидный шлак.

По нашим представлениям, пылевидный шлак можно дополнительно подвергать магнитной сепарации, что позволит добывать магнетитовый концентрат, который к тому же дополнительно содержит 3-4% ZnO. При этом объем шлакоотвала уменьшится на 20 об.% (примерно столько минерала содержится в породе). Магнетит в нашей стране является рудой на железо, его можно будет перепродавать на заводы черной металлургии или химической промышленности. Возможно, СУМЗ уже занимается этим, так как это вполне очевидный вывод, но нам не удалось получить эту информацию. Переработку оставшегося пылевидного шлака можно отложить до будущих времен, когда добыча железа из силикатов станет рентабельной, а пока их можно считать потенциальной железной рудой.

### Заключение

Таким образом, нами рассмотрена и дополнена минералогия литых шлаков Среднеуральского медеплавильного завода. Установлено, что они сложены фаялитом и железистым авгитом с присутствием магнетита, стекла и хромшпинелида (хромита и магнезиохромита). Сульфидная составляющая в основном представлена кубанитом и борнитом, реже идаитом,

сфалеритом, галенитом и Zn-аналогом кубанита. Кроме того, отмечается арсенидно-стибнидная минерализация, сложенная брейтгауптитом, вестервельдитом, купростибитом и алларгентумом. Металлы и интерметаллиды представлены медью и аурикупридом. Литые шлаки СУМЗа активно перерабатываются с выделением сульфидного концентрата и благородных металлов и получением пылевидного черного песка. Из последнего можно попутно выделять магнетитовый концентрат, что позволит уменьшить объем шлаков почти на 20%.

#### Список источников

1. Металлургические заводы Урала XVII – XX вв. Энциклопедия / под ред. В.В. Алексеева. Екатеринбург: Академкнига, 2001. 536 с.
2. Макаров А.Б. Техногенные месторождения минерального сырья // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6. № 8. С. 76–80.
3. Техногенное минеральное сырье Урала: монография / Перепелицын В.А., Рытвин В.М., Коротеев В.А., Макаров А.Б., Григорьев В.Г., Гильварг С.И., Абызов В.А., Абызов А.Н., Табулович Ф.А. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. 332 с.
4. Макаров А.Б., Талалай А.Г. Техногенно-минеральные месторождения и их экологическая роль // Литосфера. 2012. № 1. С. 172–176.
5. Оценка мобильности элементов из отходов переработки медеплавильных шлаков в лесные почвы / Золотова Е.С., Рябинин В.Ф., Котельникова А.Л., Иванова Н.С. // Литосфера, 2020. Т. 20. № 5. С. 717–726. DOI:10.24930/1681-9004-2020-20-5-717-726
6. Техногенные месторождения Среднего Урала и оценка их воздействия на окружающую среду: монография / Мормиль С.И., Сальников В.Л., Амосов Л.А., Хасанова Г.Г., Семьячков А.И., Зобнин Б.Б., Бурмистренко А.В. Екатеринбург: ДПР по Уральскому региону, 2002. 206 с.
7. Макаров А.Б. Главные типы техногенно-минеральных месторождений Урала. Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2006. 206 с.
8. Ерохин Ю.В., Козлов П.С. Фаялит из шлаков Среднеуральского медеплавильного завода (г. Ревда) // Минералогия техногенеза – 2010: сборник докладов XI научного семинара / отв. ред. С.С. Потапов. Миасс: ИМин УрО РАН, 2010. С. 32–40.
9. Ерохин Ю.В., Козлов П.С. Магнетитовый шлак из Среднеуральского медеплавильного завода // Минералогия техногенеза – 2013: сборник докладов XIV научного семинара / отв. ред. С.С. Потапов. Миасс: ИМин УрО РАН, 2013. С. 29–37.
10. Ерохин Ю.В., Козлов П.С., Хиллер В.В. Купритовый шлак из Среднеуральского медеплавильного завода // Минералогия техногенеза – 2011: сборник докладов XII научного семинара / отв. ред. С.С. Потапов. Миасс: ИМин УрО РАН, 2011. С. 26–38.
11. Использование отходов переработки отвальных шлаков для рекультивации земель горнодобывающего комплекса / Гуман О.М., Долинина И.А., Макаров А.Б., Рудой А.Г. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал, 2010. № 4. С. 43–49.
12. Макаров А.Б., Гуман О.М., Долинина И.А. Минеральный состав отходов переработки отвальных шлаков Среднеуральского медеплавильного завода и оценка их потенциальной экологической опасности // Вестник Уральского отделения РМО. 2010. № 7. С. 80–86.
13. Котельникова А.Л., Рябинин В.Ф. Особенности вещественного состава и перспективы использования отходов вторичной переработки отвальных медеплавильных шлаков // Литосфера. 2018. Т. 18. № 1. С. 133–139.
14. Медеплавильные шлаки и вопросы утилизации минеральных отходов / Кориневская Г.Г., Муфтахов В.А., Котельникова А.Л., Халезов Б.Д., Реутов Д.С. // Минералогия техногенеза – 2014: сборник докладов XV научного семинара / отв. ред. С.С. Потапов. Миасс: ИМин УрО РАН, 2014. С. 244–250.
15. Cipriani C., Corazza M., Mazzetti G. Reinvestigation of natural silver antimonides // European Journal of Mineralogy. 1996, vol. 8, pp. 1347–1350.
16. Новые данные по кристаллохимии и свойствам природных интерметаллических соединений системы Cu – Au / Новгородова М.И., Цепин А.И., Горшков А.И., Кудрович И.М., Вьяльсов Л.Н. // Записки ВМО. 1977. Ч. 106. Вып. 5. С. 540–552.

#### References

1. Alekseev V.V. *Metallurgicheskiye zavody Urala XVII – XX vv. Entsiklopediya*. [Metallurgical plants of the Urals XVII – XX centuries. Encyclopedia]. Yekaterinburg: Academic Book Publishing House, 2001, 536 p. (In. Russ.)
2. Makarov A.B. Technogenic deposits of mineral raw materials. *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal* [Soros educational journal], 2000;6(8):76–80. (In. Russ.)
3. Perepelitsyn V.A., Rytvin V.M., Koroteev V.A., Makarov A.B., Grigoriev V.G., Gilvarg S.I., Abyzov V.A., Abyzov A.N., Tabulovich F.A. *Tekhnogennoye mineralnoye syr'ye Urala* [Technogenic mineral raw materials of the Urals]. Yekaterinburg: RIO UB RAS, 2013, 332 p. (In. Russ.)
4. Makarov A.B., Talalay A.G. Technogenic mineral deposits and their ecological role. *Litosfera* [Lithosphere], 2012;12(1):172–176. (In. Russ.)
5. Zolotova E.S., Ryabinin V.F., Kotelnikova A.L., Ivanova N.S. Assessment of the mobility of elements from copper smelter slag processing waste into forest soils. *Litosfera* [Lithosphere], 2020;20(5):717–726. (In. Russ.)
6. Mormil S.I., Salnikov V.L., Amosov L.A., Khasanova G.G., Semyachkov A.I., Zobnin B.B., Burmistroenko A.V. *Tekhnogennyye mestorozhdeniya Srednego Urala i otsenka ikh vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu* [Technogenic deposits of the Middle Urals and assessment of their impact on the environment]. Yekaterinburg: DPR for the Ural region, 2002, 206 p. (In. Russ.)
7. Makarov A.B. *Glavnyye tipy tekhnogenno-mineralnykh mestorozhdeniy Urala* [Main types of technogenic mineral deposits of the Urals]. Yekaterinburg: Publishing house of UGMU, 2006, 206 p. (In. Russ.)
8. Erokhin Yu.V., Kozlov P.S. Fayalite from slags of the Sredneursky copper-smelting plant (Revda). *Mineralogiya tekhnogeneza – 2010* [Mineralogy of Technogenesis – 2010]. Miass: IMin UrBr RAS, 2010, pp. 32–40. (In. Russ.)
9. Erokhin Yu.V., Kozlov P.S. *Magnetitovyy shlak iz Sredneural'skogo medepлавиль'nogo zavoda* [Magnetite slag from the Sredneursk copper smelter]. *Mineralogiya tekhnogeneza – 2013* [Mineralogy of technogenesis – 2013]. Miass: IMin UrBr RAS, 2013, pp. 29–37. (In. Russ.)

10. Erokhin Yu.V., Kozlov P.S., Khiller V.V. *Kupritovyy shlak iz Sredneuralskogo medeplavil'nogo zavoda* [Cuprite slag from the Sredneuralsk copper smelter]. *Mineralogiya tekhnogeneza – 2011* [Mineralogy of technogenesis – 2011]. Miass: IMin UrBr RAS, 2011, pp. 26-38. (In. Russ.)
11. Guman O.M., Dolinina I.A., Makarov A.B., Rudoy A.G. Use of waste from processing of dump slags for reclamation of lands of the mining complex. *Izvestiya Vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal* [News of Higher Educational Institutions. Mining Journal], 2010;(4):43-49. (In. Russ.)
12. Makarov A.B., Guman O.M., Dolinina I.A. Mineral composition of waste from processing of waste slags of the Sredneuralsk copper smelter and assessment of their potential environmental hazard. *Vestnik Uralskogo otdeleniya RMO* [Bulletin of the Ural Branch of the RMS], 2010;(7):80-86. (In. Russ.)
13. Kotelnikova A.L., Ryabinin V.F. Features of the material composition and prospects for the use of waste from secondary processing of copper smelting slags. *Litosfera* [Lithosphere], 2018;18(1):133-139. (In. Russ.)
14. Korinevskaya G.G., Muftakhov V.A., Kotelnikova A.L., Khalezov B.D., Reutov D.S. Copper smelting slags and issues of mineral waste utilization. *Mineralogiya tekhnogeneza – 2014* [Mineralogy of technogenesis – 2014]. Miass: IMin UrBr RAS, 2014, pp. 244-250. (In. Russ.)
15. Cipriani C., Corazza M., Mazzetti G. Reinvestigation of natural silver antimonides. *Europ. Jour. Miner.* 1996;8:1347-1350.
16. Novgorodova M.I., Tsepin A.I., Gorshkov A.I., Kudrevich I.M., Vyalsov L.N. New data on crystal chemistry and properties of natural intermetallic compounds of the Cu – Au system. *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva* [Notes of the All-Union Mineralogical Society], 1977;106(5):540-552. (In. Russ.)

Поступила 01.10.2024; принята к публикации 24.10.2024; опубликована 30.06.2025  
Submitted 01/10/2024; revised 24/10/2024; published 30/06/2025

**Ерохин Юрий Викторович** – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии и геохимии имени академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия.  
Email: erokhin-yu@yandex.ru, ORCID 0000-0002-0577-5898

**Козлов Павел Сергеевич** – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии и геохимии имени академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия.  
Email: geoeco2012@yandex.ru

**Захаров Анатолий Владимирович** – научный сотрудник, Институт геологии и геохимии имени академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия.  
Email: zakharov-zav@yandex.ru. ORCID 0000-0001-8790-7892

**Ширяев Павел Борисович** – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт геологии и геохимии имени академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия.  
Email: pavel.shiryayev@gmail.com. ORCID 0000-0002-3090-6001

**Леонова Любовь Владимировна** – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и геохимии имени академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия.  
Email: lvleonova@yandex.ru. ORCID 0000-0002-7713-8994

**Yury V. Erokhin** – PhD (Eng.), Leading Research Worker, Institute of Geology and Geochemistry, RAS Ural Branch, Yekaterinburg, Russia.  
Email: erokhin-yu@yandex.ru. ORCID 0000-0002-0577-5898

**Pavel S. Kozlov** – DrSc (Eng.), Leading Research Worker, Institute of Geology and Geochemistry, RAS Ural Branch, Yekaterinburg, Russia.  
Email: geoeco2012@yandex.ru.

**Anatoly V. Zakharov** – Researcher, Institute of Geology and Geochemistry, RAS Ural Branch, Yekaterinburg, Russia.  
Email: zakharov-zav@yandex.ru. ORCID 0000-0001-8790-7892

**Pavel B. Shiryayev** – PhD (Eng.), Researcher, Institute of Geology and Geochemistry, RAS Ural Branch, Yekaterinburg, Russia.  
Email: pavel.shiryayev@gmail.com. ORCID 0000-0002-3090-6001

**Lyubov V. Leonova** – PhD (Eng.), Senior Researcher, Institute of Geology and Geochemistry, RAS Ural Branch, Yekaterinburg, Russia.  
Email: lvleonova@yandex.ru. ORCID 0000-0002-7713-8994

# ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

## MATERIAL PROCESS ENGINEERING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.99

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-88-96



### ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ РЕЗЬБЫ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ НАЛАДКИ

Мальков О.В., Карельский А.С.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**Аннотация.** Постановка задачи (актуальность работы). Для изготовления внутренней резьбы используется резьбофрезерование гребенчатыми фрезами, как наиболее гибкий и универсальный способ обработки, не уступающий по производительности обработке метчиками. Для достижения наибольшей производительности следует обрабатывать резьбу на всю ее длину гребенчатыми инструментами за один полный оборот вокруг оси резьбы, в результате чего увеличивается угловое и радиальное перемещение торца инструмента из-за его конусного закрепления в инструментальной наладке и несовпадения осей инструмента и резьбы. Это является причиной возникновения под действием силы резания конусности резьбы, прогнозирование которой позволит определить геометрические параметры нового инструмента, а также скорректировать параметры режима резания для получения резьбы заданной точности. **Цель работы.** Разработать теоретическую модель для расчета конусности резьбы, основанную на теоретической модели силы резания при резьбофрезеровании гребенчатыми резьбовыми фрезами. **Используемые методы.** Теоретическая модель конусности резьбы после резьбофрезерования была реализована в программе PTC Mathcad Prime 3.1. **Новизна.** Предложена последовательность расчета конусности внутренней метрической резьбы, образуемой при радиальном и угловом перемещении инструментальной наладки из-за силового взаимодействия инструмента с заготовкой. В расчете использована ранее разработанная теоретическая модель расчета составляющих силы при резьбофрезеровании гребенчатой резьбовой фрезой, также учтено влияние инструментальной наладки, содержащей цанговый патрон. **Результат.** Работоспособность предложенной теоретической модели расчета конусности при фрезеровании гребенчатыми резьбовыми фрезами подтверждена сравнительным анализом расчетных значений конусности с экспериментальными данными, который показал схожую тенденцию. **Практическая значимость.** Результаты расчетного эксперимента с использованием сравнительного анализа с экспериментальными данными по конусности реальных образцов резьбы показали, что максимальные расчетные значения конусности превышают экспериментальные значения и могут являться ограничением для решения оптимизационных задач при проектировании нового инструмента с использованием предложенной расчетной методики.

**Ключевые слова:** резьбофрезерование, гребенчатая резьбовая фреза, сила резания, моделирование, конусность резьбы, срезаемый слой

© Мальков О.В., Карельский А.С., 2025

#### Для цитирования

Мальков О.В., Карельский А.С. Обеспечение точности резьбы при фрезеровании на основе расчета перемещения инструментальной наладки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 88-96. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-88-96>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



# PROVIDING THE ACCURACY OF THE THREAD DURING MILLING BASED ON THE CALCULATION OF THE MOVEMENT OF THE TOOL SETUP

Malkov O.V., Karelskiy A.S.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** For the manufacture of internal threads, thread milling cutter is used as the most flexible and versatile processing method, which is not inferior in performance to tap processing. To achieve the highest productivity, the thread should be processed for its entire length with tools in one complete revolution around the thread axis, as a result of which the angular and radial movement of the end of the tool increases due to its cantilever attachment in the tool setup and the mismatch of the axes of the tool and the thread. This is the reason for the appearance of a taper thread under the action of the cutting force, the forecasting of which will allow you to determine the geometric parameters of the new tool, as well as adjust the parameters of the cutting mode to obtain a thread of a given accuracy. **Objective.** Is to develop a theoretical model for calculating the taper of the thread, based on a theoretical model of the cutting force during thread milling with thread cutters. **Methods Applied.** The theoretical model of thread taper after threading was implemented in the PTC Mathcad Prime 3.1 program. **Originality.** The sequence of calculation of the taper of the internal metric thread formed during radial and angular displacement of the tool adjustment due to the force interaction of the tool with the workpiece is proposed. The calculation uses a previously developed theoretical model for calculating the components of force when threading with a thread cutter, and also takes into account the influence of a tool adjustment containing a collet chuck. **Result.** The efficiency of the proposed theoretical model for calculating taper when milling with thread cutters is confirmed by a comparative analysis of the calculated taper values with experimental data, which showed a similar trend. **Practical Relevance.** The results of a computational experiment using comparative analysis with experimental data on the taper of real thread samples showed that the maximum calculated taper values exceed the experimental values, and may be a limitation for solving optimization problems when designing a new tool using the proposed calculation methodology.

**Keywords:** thread milling, thread milling cutter, cutting force, modeling, taper of the thread, cut layer

## For citation

Malkov O.V., Karelskiy A.S. Providing the Accuracy of the Thread During Milling Based on the Calculation of the Movement of the Tool Setup. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 88-96. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-88-96>

## Введение

Резьбофрезерование широко используется при обработке резьбы в корпусных деталях на станках с ЧПУ. В отличие от обработки резьбы метчиками, при резьбофрезеровании инструмент работает как консольно закрепленная балка, в результате чего силовое взаимодействие режущей части инструмента с резьбой [1-3] приводит к радиальному и угловому перемещению инструмента с образованием конусности нарезаемой резьбы [4, 5]. Анализ конусности цилиндрической резьбы показал, что в ГОСТ 11708-82 понятие конусности резьбы отсутствует, а для конической резьбы представлен только термин «угол уклона  $\phi/2$ », где  $\phi$  – угол конуса конической резьбы. В ГОСТ Р 53365-2009 (ГОСТ Р 51906-2002) термин «конусность резьбы» присутствует, но является характеристикой конической резьбы специального назначения и заложен в конструкцию резьбы, а не является результатом силового взаимодействия инструмента и заготовки. Поскольку наиболее распространенные в обработке внутренние метрические цилиндрические резьбы нормируются допусками на средний ( $T_{D2}$ ) и внутренний ( $T_{D1}$ ) диаметры, то примем во внимание, что конусность резьбы должна на всей длине

свинчивания укладываться в поле допуска на средний диаметр резьбы.

Таким образом, целью проведенных исследований является теоретический расчет конусности внутренней метрической резьбы на основе расчета радиального и углового перемещений инструментальной наладки в результате взаимодействия инструмента с заготовкой при фрезеровании, что позволит управлять параметрами инструмента и процесса для обеспечения заданной точности резьбы.

## Определение смещения резьбовой фрезы под действием силы резания

Для определения точности резьбы и наличия конусности необходимо рассматривать резьбовую фрезу в контексте инструментальной наладки, которая включает в себя патрон. Для определения углового перемещения наладки на угол  $\phi_k$  и радиального перемещения на длину  $\Delta f_{пр}$ , связанных с податливостью наладки и упругой изгибной деформацией инструмента, была разработана расчетная схема, представленная на **рис. 1**. Для расчёта конусности резьбы необходимо определить перемещения в точках начала и конца резьбы (см. **рис. 1**, точки  $b$

и  $a$ ). Конусность резьбы  $c$  в этом случае будет определяться по формуле

$$c = 2 \cdot \frac{\Delta f_a - \Delta f_b}{l}, \quad (1)$$

где  $l$  – длина резьбы между точками  $a$  и  $b$ , мм.

При работе инструментальной наладки на каждый резьбообразующий профиль резьбовой фрезы, участвующий в формировании резьбы, действует суммарная составляющая силы резания  $P_{\Sigma}$ , которая является результатом суммарного действия касательной  $P_t$  и радиальной  $P_r$  составляющих силы резания [6]. Целые твердосплавные гребенчатые резьбовые фрезы представляют собой стержень с цилиндрическим хвостовиком и рабочей частью с винтовыми стружечными канавками длиной  $l_p$  и углом наклона  $\omega$ , из-за чего векторы составляющих силы резания лежат в разных плоскостях и вносят разный вклад в суммарную силу резания, что приводит к постоянному изменению положения инструментальной наладки в процессе обработки.

В качестве примера инструментальной наладки выбран тип закрепления цельного инструмента в цанговый патрон. Установлено, что касательная и радиальная составляющие силы резания приводят к перемещению резьбообразующих профилей фрезы. Осевая составляющая силы резания в расчете не участвует, так как вносит малый вклад за счет высокой осевой жесткости цельного твердосплавного инструмента.

Расположение касательных  $P_t$  и радиальных  $P_r$  составляющих силы резания представлено на **рис. 2** [5], где касательные и радиальные составляющие силы ре-

зания имеют индексы  $P_{ri,j}$  и  $P_{ti,j}$ , где  $i$  – номер зуба,  $j$  – номер резьбообразующего профиля в контакте. В общем случае зубья резьбовой гребенчатой фрезы имеют угол наклона  $\omega$  и содержат  $u = \frac{l_p}{P}$  резьбообразующих профилей, каждый из которых срезает слой одинаковой формы (см. **рис. 2**, стрелка  $b$ ) и, соответственно, проходит все сечения вдоль угла контакта как однодисковая резьбовая фреза [6]. Мгновенные значения составляющих силы резания определяются в месте контакта режущих кромок фрезы со срезаемым слоем для каждого резьбообразующего профиля с учетом смещения по углу контакта из-за наличия угла  $\omega$  [9], угловая координата  $j$ -го профиля  $\chi_j = j \cdot \Delta\chi$  – различна, и относительно друг друга профили смещаются на величину

$$\Delta\chi = \frac{2P \cdot \tan \omega}{d_p}. \quad (2)$$

При  $\omega \neq 0$  каждый резьбообразующий профиль будет входить в контакт с заготовкой в разное время, а при  $\omega = 0$  вершины резьбообразующих профилей находятся на одной прямой и координата  $\chi$  у всех профилей одинаковая.

В представленной модели описываются условия, когда резьбовая фреза обрабатывает резьбу на всю свою рабочую длину  $l_p$ , так как в этом случае достигается максимальная производительность обработки. В случае, когда длина резьбы меньше, чем длина рабочей части инструмента, обработка будет идти на длине резьбы  $l$ , а число одновременно работающих профилей в таком случае будет равно  $u = \frac{l}{P}$ .

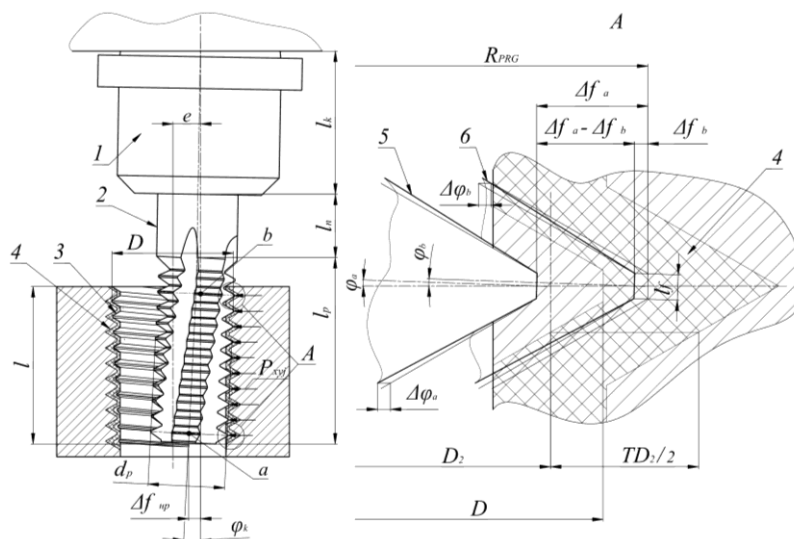


Рис. 1. Расчетная схема определения радиального и углового перемещения инструментальной наладки:

1 – цанговый патрон; 2 – резьбовая фреза; 3 – получаемая резьба; 4 – поле допуска резьбы; 5 – искажение профиля резьбы на длине резьбы  $l$  в точке  $a$ ; 6 – искажение профиля резьбы в начале резьбы в точке  $b$

Fig. 1. Calculation scheme for determining the radial and angular displacement of the tool adjustment:

1 is collet chuck, 2 is thread milling cutter, 3 is the resulting thread, 4 is thread tolerance field, 5 is distortion of the thread profile along the thread length  $l$  at point  $a$ , 6 are distortion of the thread profile at the beginning of the thread at point  $b$

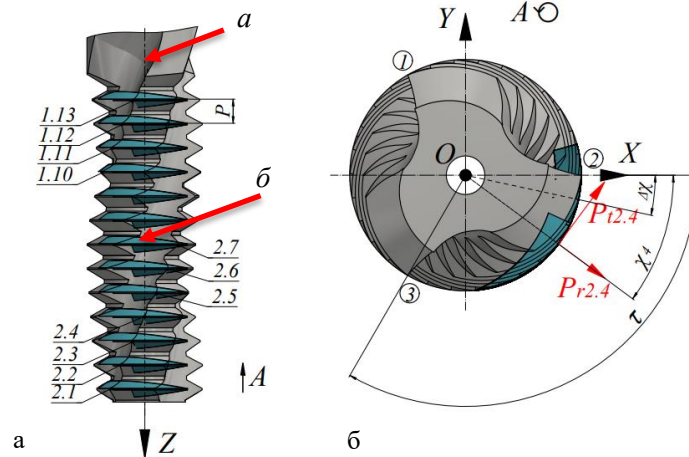


Рис. 2. Расчетная схема определения проекций касательной  $P_t$  и радиальной  $P_r$  составляющих силы:  
а – цельная резьбовая фреза; б – единственный срезаемый слой; 1.10-1.13, 2.1-2.7 – резьбообразующие профили на двух зубьях, находящиеся в контакте с заготовкой; 1, 2, 3 – номера зубьев

Fig. 2. Calculation scheme for determining the projections of tangential  $P_t$  and radial  $P_r$  components of the force:  
а is solid thread milling cutter; б is single cut layer; 1.10-1.13, 2.1-2.7 are thread-forming profiles on two teeth in contact with the workpiece; 1, 2, 3 are tooth numbers

Исходя из всех описанных условий для определения максимальных перемещений инструмента, была разработана схема нагружения фрезы, представленная на рис. 3. В качестве нагрузки с каждого  $j$ -го резьбообразующего профиля фрезы на ось действуют рассчитанные проекции на ортогональные оси  $P_{xj}$  и  $P_{yj}$  составляющих силы резания, вследствие чего ось инструмента отклоняется на расстояние  $\Delta f_x$  по оси  $X$  и на  $\Delta f_y$  по оси  $Y$ . Составляющие силы  $P_{xj}$  и  $P_{yj}$  вдоль оси  $Z$  являются переменными на каждом резьбообразующем профиле, что приводит к изменению в пространстве суммарной составляющей  $P_{xy}$  и изменению положения плоскости, содержащей суммарное отклонение. Максимальные радиальное  $\Delta f_{np}$  и угловое  $\phi_k$  перемещения определяются в плоскости, содержащей максимальную суммарную равнодействующую  $P_{xy}$ . Максимальное суммарное перемещение  $\Delta f_{np}^f$  определяется как

$$\Delta f_{np}^f = \sqrt{\Delta f_x^2 + \Delta f_y^2}. \quad (3)$$

Для определения составляющих силы резания  $P_{xj}$  и  $P_{yj}$  касательные  $P_t$  и радиальные  $P_r$  составляющие проецировались на ортогональные оси  $X$  и  $Y$  для каждого резьбообразующего профиля:

$$\begin{aligned} P_{xj} = & P_{t1,j} \cdot \sin(\tau - \chi_j) + P_{r1,j} \cdot \cos(\tau - \chi_j) + \\ & + P_{t2,j} \cdot \sin(-\chi_j) + P_{r2,j} \cdot \cos(-\chi_j) + \\ & + P_{t3,j} \cdot \sin(-\tau - \chi_j) + P_{r3,j} \cdot \cos(\tau - \chi_j); \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} P_{yj} = & P_{t1,j} \cdot \cos(\tau - \chi_j) - P_{r1,j} \cdot \sin(\tau - \chi_j) + \\ & + P_{t2,j} \cdot \cos(-\chi_j) - P_{r2,j} \cdot \sin(-\chi_j) + \\ & + P_{t3,j} \cdot \cos(-\tau - \chi_j) - P_{r3,j} \cdot \sin(-\tau - \chi_j), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $P_{t1,j}$ ,  $P_{t2,j}$ ,  $P_{t3,j}$  и  $P_{r1,j}$ ,  $P_{r2,j}$ ,  $P_{r3,j}$  – касательные и радиальные составляющие силы при резьбофрезеро-

вании на  $j$ -м профиле 1, 2 и 3 зуба соответственно (см. рис. 2).

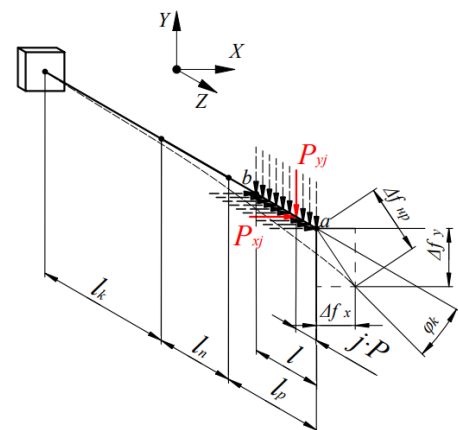


Рис. 3. Расчетная схема для определения перемещения наладки вследствие ее нагружения составляющими силами  $P_x$  и  $P_y$

Fig. 3. Calculation scheme for determining the displacement of the adjustment due to its loading by the force components  $P_x$  and  $P_y$

Угловым шагом зубьев  $\tau$  должен учитывать неравномерность  $\Delta\tau$  (для учета вибраций при обработке) и погрешность изготовления  $\delta\tau_z$ , которые могут быть как положительными, так и отрицательными:

$$\tau = \frac{360^\circ}{z} \pm \Delta\tau \pm \delta\tau_z. \quad (6)$$

Значения проекций составляющих силы резания участвуют в расчете перемещений наладки, а для углового перемещения необходимо определить равнодействующую составляющую:

$$P_{xyj} = \sqrt{P_{xj}^2 + P_{yj}^2}. \quad (7)$$

Для расчета  $\Delta f_{\text{нр}}$  необходимо вычислить интеграл Мора от изгибающих моментов по осям  $X$  и  $Y$ . Для этого на рис. 4, а построены эпюры изгибающих моментов от составляющих силы, действующей на  $j$ -й резьбообразующий профиль, и от единичной силы, приложенной в точку  $a$ . Представленные эпюры от силы  $P_{xj}$  по оси  $X$  разделены на участки согласно элементам наладки: участок патрона длиной  $l_k$ , участки хвостовика фрезы  $l_n$  и ее режущей части  $l_p$ , имеющие разные сечения и моменты инерции  $J_k$ ,  $J_n$  и  $J_p$  соответственно. Схема расчета перемещения от силы  $P_{yj}$  будет аналогичной.

Максимальное перемещение  $\Delta f_{xa}$  в точке  $a$  будет определяться как сумма перемещений от силы  $P_{xj}$  на каждый резьбообразующий профиль. Формула для вычисления максимального перемещения с учетом контактной податливости инструментальной наладки принимает вид

$$\Delta f_{xa} = \sum_{j=1}^u \left[ \int_0^{l_k} \frac{M_{xj}(z) \cdot M_{1x}(z)}{E_k \cdot J_k} dz + \int_{l_k}^{l_k+l_n} \frac{M_{xj}(z) \cdot M_{1x}(z)}{E \cdot J_n} dz + \int_{l_k+l_n}^{l_k+l_n+l_p} \frac{M_{xj}(z) \cdot M_{1x}(z)}{E \cdot J_p} dz + \right. \\ \left. + \int_{l_k+l_n}^{l_k+l_n+l_p} \frac{M_{xj}(z) \cdot M_{1x}(z)}{E \cdot J_{px}} dz + P_{xj} \cdot \frac{\theta_1}{M} \cdot (l_\Sigma - j \cdot P)^2 + P_{xj} \cdot \frac{\theta_2}{M} \cdot (l_n + l_p - j \cdot P)^2 \right], \quad (8)$$

где  $j$  – номер профиля;  $E$  и  $E_k$  – модуль Юнга материала фрезы и материала цангового патрона, МПа;  $\frac{\theta_1}{M}$  и  $\frac{\theta_2}{M}$  – контактная податливость в стыках закрепления фрезы на станке в цанговом патроне [7].

В представленной модели рассматривалась обработка резьбы в заготовках, жесткость которых, с учетом их закрепления на рабочем столе станка, значительно превышает жесткость инструментальной

наладки. Вследствие чего заготовка принималась как абсолютно жесткий элемент, а влияние материала заготовки на силу резания учтено в расчете [9].

В расчете использовались значения контактной податливости для закрепления цангового патрона в конусе шпинделя станка  $\frac{\theta_1}{M}$ ,  $(\text{кН} \cdot \text{м})^{-1}$ , и фрезы в цанговом патроне –  $\frac{\theta_2}{M}$ .

С учетом раскрытия интегралов формула имеет следующий вид:

$$\Delta f_{xa} = \frac{P_{xj}}{E_k \cdot J_k} \cdot \left( l_\Sigma \cdot (l_\Sigma - j \cdot P) \cdot l_k + \frac{l_k^2}{2} \cdot (j \cdot P - 2 \cdot l_\Sigma) + \frac{l_k^3}{3} \right) + \\ + \frac{P_{xj}}{E \cdot J_n} \cdot \left( \left( l_\Sigma \cdot (l_\Sigma - j \cdot P) \cdot (l_k + l_n) + \frac{(l_k + l_n)^2}{2} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times (j \cdot P - 2 \cdot l_\Sigma) + \frac{(l_k + l_n)^3}{3} \right) - \left( l_\Sigma \cdot (l_\Sigma - j \cdot P) \cdot l_k + \frac{l_k^2}{2} \cdot (j \cdot P - 2 \cdot l_\Sigma) + \frac{l_k^3}{3} \right) \right) + \\ + \frac{P_{xj}}{E \cdot J_{px}} \cdot \left( \left( l_\Sigma \cdot (l_\Sigma - j \cdot P) \cdot (l_\Sigma - j \cdot P) + \frac{(l_\Sigma - j \cdot P)^2}{2} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times (j \cdot P - 2 \cdot l_\Sigma) + \frac{(l_\Sigma - j \cdot P)^3}{3} \right) - \left( l_\Sigma \cdot (l_\Sigma - j \cdot P) \cdot (l_k + l_n) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{(l_k + l_n)^2}{2} \cdot (j \cdot P - 2 \cdot l_\Sigma) + \frac{(l_k + l_n)^3}{3} \right) \right) + \\ + P_{xj} \cdot \frac{\theta_1}{M} \cdot (l_\Sigma - j \cdot P)^2 + P_{xj} \cdot \frac{\theta_2}{M} \cdot (l_n + l_p - j \cdot P)^2. \quad (9)$$

Перемещение по оси  $Y$  от нагрузки  $P_{yj}$  рассчитывается по аналогичной формуле (9).

Моменты инерции хвостовика  $J_n$  и сечения патрона  $J_k$  рассчитываются по формуле для расчета момента инерции круглого сечения:

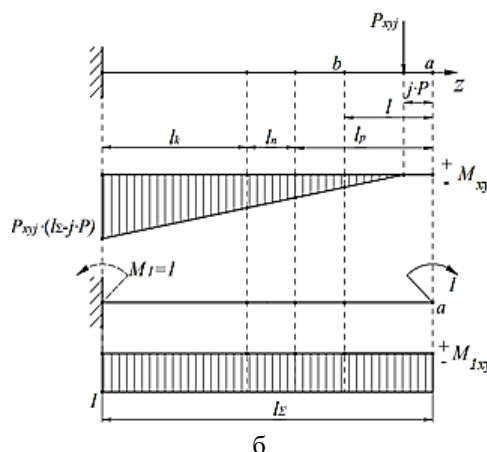
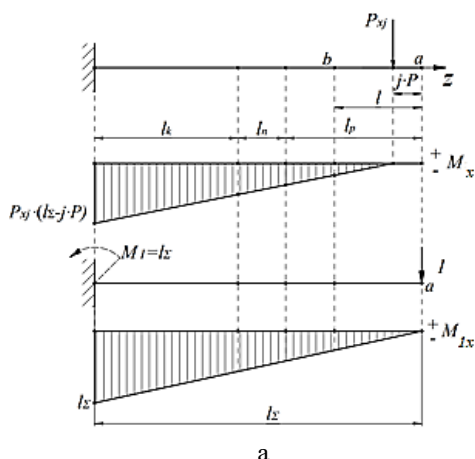


Рис. 4. Эпюры изгибающего момента  $M_x$  под действием силы  $P_{xj}$  и момента  $M_{1x}$  от единичной силы в точке  $a$  (а) и эпюры изгибающего момента  $M_{xy}$  под действием силы  $P_{xyj}$  и единичного момента  $M_{1xy}$  в точке  $a$  (б)

Fig. 4. Diagrams of the bending moment  $M_x$  under the action of the force  $P_{xj}$  and the moment  $M_{1x}$  from the unit force at point  $a$  (a) and diagrams of the bending moment  $M_{xy}$  under the action of the force  $P_{xyj}$  and the unit moment  $M_{1xy}$  at point  $a$  (b)



$$J = \frac{\pi \cdot d^4}{64}, \quad (10)$$

где  $d$  – наружный диаметр соответствующего элемента наладки, мм.

В связи с тем, что при нечетном количестве зубьев сечение рабочей части фрезы является несимметричным относительно системы координат, то для расчета момента инерции необходимо определить момент инерции относительно оси  $X (J_{px})$  и оси  $Y (J_{py})$ . Определение осевых моментов инерции сечения производилось в программе *Autodesk Inventor Professional 2018*. Форма стружечной канавки определялась по точкам в программе САПР резбовых фрез [8]. Полученные результаты анализа сечения фрезы показали, что наблюдается постоянство моментов инерции, при котором  $J_{px} \approx J_{py}$  при повороте сечения относительно начала координат для четного и нечетного количества зубьев резбовых фрез  $z = 3-7$  с отклонением, не превышающим 5%.

Для определения расположения профиля резьбы в поле допуска резьбы (см. **рис. 1**), помимо смещения  $\Delta f_{np}$ , необходимо также определить и угол поворота наладки  $\varphi_k$ . Максимальные радиальные и угловые перемещения наладки соответствуют перемещению в точке  $a$ :  $\Delta f_{np} = \Delta f_a$  и  $\varphi_k = \varphi_a$ .

Построены эпюры для определения угла поворота инструментальной наладки от равнодействующей составляющей силы резания, приложенной к соответствующему резьбообразующему профилю (см. **рис. 4, б**).

При определении углового перемещения в точке  $a$  формула примет вид

$$\varphi_a = \sum_{j=1}^u \left( \int_0^{l_k} \frac{M_{xyj}(z) \cdot M_{1xy}(z)}{E_k \cdot J_k} dz + \int_{l_k}^{l_k+l_n} \frac{M_{xyj}(z) \cdot M_{1xy}(z)}{E \cdot J_n} dz + \int_{l_k+l_n}^{l_k+l_n+l_p} \frac{M_{xyj}(z) \cdot M_{1xy}(z)}{E \cdot J_{pxy}} dz + \arctg \left( P_{xj} \cdot \frac{\theta_1}{M} \cdot (l_\Sigma - j \cdot P)^2 \right) + \arctg \left( P_{xj} \cdot \frac{\theta_2}{M} \cdot (l_n + l_p - j \cdot P)^2 \right) \right). \quad (11)$$

Раскрытие интеграла на примере первого участка  $[0; l_k]$  принимает вид

$$\begin{aligned} \varphi_a = & \frac{P_{xyj}}{E_k \cdot J_k} \cdot \left( (l_\Sigma - j \cdot P) \cdot l_k - \frac{l_k^2}{2} \right) + \frac{P_{xyj}}{E \cdot J_n} \times \\ & \times \left( \left( (l_\Sigma - j \cdot P) \cdot (l_k + l_n) - \frac{(l_k + l_n)^2}{2} \right) - \left( (l_\Sigma - j \cdot P) \cdot l_k - \frac{l_k^2}{2} \right) \right) + \\ & + \frac{P_{xyj}}{E \cdot J_{pxy}} \cdot \left( \left( (l_\Sigma - j \cdot P) \cdot (l_n + l_p) - \frac{(l_n + l_p)^2}{2} \right) - \left( (l_\Sigma - j \cdot P) \cdot (l_k + l_n) - \frac{(l_k + l_n)^2}{2} \right) \right) + \\ & + \arctg \left( P_{xj} \cdot \frac{\theta_1}{M} \cdot (l_\Sigma - j \cdot P)^2 \right) + \arctg \left( P_{xj} \cdot \frac{\theta_2}{M} \cdot (l_n + l_p - j \cdot P)^2 \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Момент инерции сечения на режущей части фрезы рассчитывается по формуле

$$J_{pxy} = \sqrt{J_{px}^2 + J_{py}^2}. \quad (13)$$

Для определения конусности на всей длине резьбы необходимо рассчитать перемещения профиля резьбы в точке  $b$  (см. **рис. 1**). В этом случае изменяются только эпюры момента от единичной силы и единичного момента, которые прикладываются в точку  $b$  (**рис. 5**), а расчет перемещения производится по формуле

$$\Delta f_{xb} = \sum_{j=1}^u \left( \int_0^{l_k} \frac{M_{xj}(z) \cdot M_{1x}(z)}{E_k \cdot J_k} dz + \int_{l_k}^{l_k+l_n} \frac{M_{xj}(z) \cdot M_{1x}(z)}{E \cdot J_n} dz + \int_{l_k+l_n}^{l_k+l_n+l_p} \frac{M_{xj}(z) \cdot M_{1x}(z)}{E \cdot J_{pxy}} dz + P_{xj} \cdot \frac{\theta_1}{M} \cdot ((l_\Sigma - l) \cdot (l_\Sigma - j \cdot P)) + P_{xj} \cdot \frac{\theta_2}{M} \cdot ((l_n + l_p - l) \cdot (l_n + l_p - j \cdot P)) \right). \quad (14)$$

Раскрытие интеграла на примере первого участка имеет вид

$$\begin{aligned} \Delta f_{xb} = & \frac{P_{xj}}{E_k \cdot J_k} \cdot \left( (l_\Sigma \cdot (l_\Sigma - l - j \cdot P) + j \cdot P \cdot l) \cdot l_k + \frac{l_k^2}{2} \cdot (j \cdot P + l - 2 \cdot l_\Sigma) + \frac{l_k^3}{3} \right) + \\ & + \frac{P_{xj}}{E \cdot J_n} \cdot \left( \left( (l_\Sigma \cdot (l_\Sigma - l - j \cdot P) + j \cdot P \cdot l) \cdot (l_k + l_n) + \frac{(l_k + l_n)^2}{2} \cdot (j \cdot P + l - 2 \cdot l_\Sigma) + \frac{(l_k + l_n)^3}{3} \right) - \right. \\ & \left. - \left( (l_\Sigma \cdot (l_\Sigma - l - j \cdot P) + j \cdot P \cdot l) \cdot l_k + \frac{l_k^2}{2} \cdot (j \cdot P + l - 2 \cdot l_\Sigma) + \frac{l_k^3}{3} \right) \right) + \\ & + \frac{P_{xj}}{E \cdot J_{pxy}} \cdot \left( \left( (l_\Sigma \cdot (l_\Sigma - l - j \cdot P) + j \cdot P \cdot l) \cdot (l_n + l_p) + \frac{(l_n + l_p)^2}{2} \cdot (j \cdot P + l - 2 \cdot l_\Sigma) + \frac{(l_n + l_p)^3}{3} \right) - \right. \\ & \left. - \left( (l_\Sigma \cdot (l_\Sigma - l - j \cdot P) + j \cdot P \cdot l) \cdot (l_k + l_n) + \frac{(l_k + l_n)^2}{2} \cdot (j \cdot P + l - 2 \cdot l_\Sigma) + \frac{(l_k + l_n)^3}{3} \right) \right) + \\ & + P_{xj} \cdot \frac{\theta_1}{M} \cdot ((l_\Sigma - l) \cdot (l_\Sigma - j \cdot P)) + P_{xj} \cdot \frac{\theta_2}{M} \cdot ((l_n + l_p - l) \cdot (l_n + l_p - j \cdot P)). \end{aligned} \quad (15)$$

Угловое перемещение в точке  $b$  рассчитывается по формуле:

$$\varphi_b = \sum_{j=1}^n \left( \int_0^{l_k} \frac{M_{xyj}(z) \cdot M_{1xy}(z)}{E_k \cdot J_k} dz + \int_{l_k}^{l_k+l_n} \frac{M_{xyj}(z) \cdot M_{1xy}(z)}{E \cdot J_n} dz + \int_{l_k+l_n}^{l_k+l_n+l_p-l} \frac{M_{xyj}(z) \cdot M_{1xy}(z)}{E \cdot J_{pxy}} dz + \right. \\ \left. + \arctg \left( P_{xy} \cdot \frac{\theta_1}{M} \cdot ((l_\Sigma - l) \cdot (l_\Sigma - j \cdot P)) \right) + \arctg \left( P_{xy} \cdot \frac{\theta_2}{M} \cdot ((l_n + l_p - l) \cdot (l_n + l_p - j \cdot P)) \right) \right) \quad (16)$$

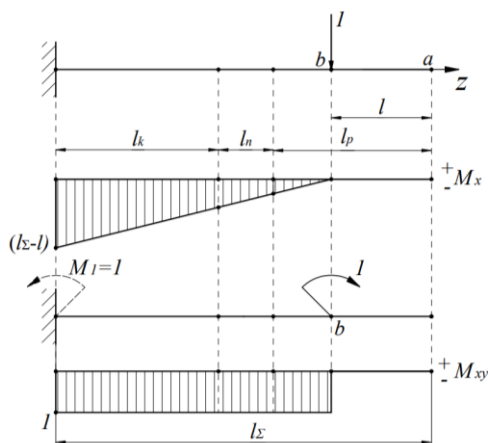


Рис. 5. Эпюры изгибающего момента  $M_x$  под действием единичной силы и момента  $M_{xy}$  от единичного момента в точке  $b$   
Fig. 5. Diagrams of the bending moment  $M_x$  under the action of a single force and the moment  $M_{xy}$  from a single moment at point  $b$

Проведен анализ скручивания наладки под действием касательных составляющих силы  $P_{ij}$  на каждый  $j$ -й резбообразующий профиль каждого зуба, который показал, что угловые перемещения не превышают  $0,05^\circ$  и не сказываются на точности резьбы, поэтому ими можно пренебречь.

Представленная последовательность расчета в полной мере позволяет определить радиальное и угловое перемещение инструментальной наладки от силы в процессе резания, но только для одного дискретного положения фрезы при определенном наборе касательных и радиальных составляющих силы резания. Для получения полной картины изгиба инструмента при обработке на всем угле контакта необходимо использовать модели силы резания, позволяющие оценить ее изменение за все время обработки [9].

Для проверки работоспособности предложены модели расчета конусности при резбофрезеровании, был проведен расчет для инструментальной наладки, используемой на обрабатывающем центре DMC 635V Ecoline при фрезеровании фрезой Sandvik Coromant R217.15140100AC26N1630 при закреплении в цанговый патрон с цангой ER25 и хвостовиком BT40, и произведено сравнение с полученными экспериментальными значениями конусности из работы [10]. Исходные данные для расчета:  $J_k = 1,3 \cdot 10^5 \text{ мм}^4$ ,  $J_n = 1,85 \cdot 10^3 \text{ мм}^4$ ,  $J_p = 757,018 \text{ мм}^4$ ,  $E_k = 2,0 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ ,  $E = 5,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ ,  $\frac{\theta_1}{M} = 1,91 \cdot 10^{-3} (\text{кН} \cdot \text{м})^{-1}$ ,  $\frac{\theta_2}{M} = 4,7 \cdot 10^{-3} (\text{кН} \cdot \text{м})^{-1}$ . Для подстановки в формулы расчета линей-

ных и угловых перемещений инструментальной наладки были сформированы массивы данных составляющих силы резания по модели силы резания для гребенчатых резбовых фрез [9].

Проведено сравнение полученных расчетных значений конусности резьбы с экспериментальными значениями и получены графики изменения конусности резьбы от подачи на зуб  $S_z$  и длины резьбы  $l$  как наиболее сильно влияющие на конусность, представленные на рис. 6. В качестве постоянных значений эксперимента приняты: диаметр режущей части фрезы  $d_p = 14 \text{ мм}$ ; длина режущей части фрезы  $l_p = 32 \text{ мм}$ ; диаметр резьбы  $D = 16 \text{ мм}$ ; шаг резьбы  $P = 1 \text{ мм}$ ; подача на зуб  $S_z = 0,1 \text{ мм/зуб}$ ; скорость резания  $V = 120 \text{ м/мин}$ ; длина фаски резбообразующего профиля  $l_f = 0,1 \text{ мм}$ ; передний угол в торцовом сечении  $\gamma_t = 10^\circ$ ; задний угол в торцовом сечении  $\alpha_t = 9^\circ$ ; износ по задней поверхности  $h_3 = 0,08 \text{ мм}$ ; радиус округления режущих кромок резбообразующего профиля  $\rho = 0,01 \text{ мм}$ ; величина биения зубьев  $\Delta h = 0$ ; угол наклона винтовых стружечных канавок  $\omega = 10^\circ$ ; число зубьев  $z = 5$ . Исходные значения ограничены принятой конструкцией гребенчатой резбовой фрезы.

Проведенный для указанных выше исходных данных расчет показал, что для максимальной длины резьбы  $l = 22 \text{ мм}$  (принятой при проведении лабораторных экспериментов) значения максимальных радиального и углового перемещений фрезы составляют  $\Delta f_{\text{нр}} = 0,06 \text{ мм}$  и  $\varphi_k = 0,03^\circ = 1,8'$ . Видно, что угловое перемещение является несущественным для принятых условий расчета, и искажением углов резбообразующего профиля инструмента вследствие силового взаимодействия можно пренебречь.

Представленные расчетные зависимости описывают максимальные значения конусности, достигаемые при максимальной силе в данных условиях эксперимента. Из рис. 6 видно, что при увеличении подачи и длины резьбы увеличивается конусность резьбы, что показывает связь с толщиной срезаемого слоя и увеличением длины срезаемого слоя, а следовательно, и с силой резания. Расхождение графиков связано с тем, что измерение конусности на реальных образцах [10] производилось в единственном сечении резьбы, и нельзя сопоставить расположение инструмента в момент получения измеряемого сечения резьбы и оценить фактическую конусность, а также не учитывались вибрации, возникающие в процессе обработки. Расчет проводился для максимальных значений силы резания внутри угла контакта фрезы с заготовкой. На основании этого можно сделать вывод, что расчетные зависимости описывают предельные значения конусности для выбранных усло-

вий обработки, а экспериментальные значения не превышают их.

Максимально допустимое расчетное значение конусности для оценки ее предельного состояния необходимо сравнить с полем допуска резьбы на средний диаметр резьбы  $T_{D2}$ :

$$c_{\max} \leq \frac{T_{D2}}{l}.$$

Для резьбы М16 с шагом  $P = 1$  мм –  $T_{D2} = 160$  мкм (6Н) ГОСТ16093-2004. Для  $l_p = 10$  мм получим

$$c_{\max} \leq \frac{0,160}{10} = 0,016. \text{ Из рис. 6 видно, что это усло-}$$

вие выполняется во всем расчетном диапазоне параметров, что позволяет сделать вывод о работоспособности предложенной последовательности расчета конусности резьбы на основании модели силы резания для гребенчатых резьбовых фрез.

В статье представлен частный случай резбозерезерования, для которого максимальная расчетная конусность в 3,8 раза меньше конусности для принятого поля допуска на средний диаметр резьбы. Однако в случаях фрезерования резьбы точного класса или в случаях возможного увеличения силы резания (инструментом с малым диаметром, длинной рабочей частью, большим шагом резьбы, большой подачей на зуб) ситуация может измениться в сторону потери точности обработки.

### Заключение

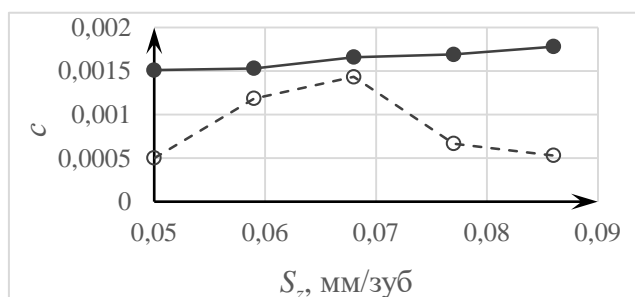
Установлено, что при силовом взаимодействии резьбовой фрезы с заготовкой формируется конусность резьбы как частный случай отклонения от цилиндричности. Предложена теоретическая модель расчета конусности резьбы с использованием разработанных ранее теоретических моделей расчета силы при резбозерезеровании однодисковыми и гребенча-

тыми фрезами, которая позволяет назначать обоснованные параметры процесса, обеспечивающие заданную точность формируемой внутренней метрической резьбы.

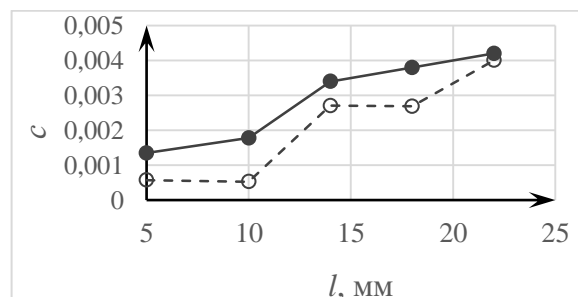
Учет в модели параметров инструментальной наладки позволяет оценить ее влияние на отклонения среднего диаметра и углов профиля резьбы. Расчеты показали, что в принятом диапазоне варьирования подачи на зуб инструмента и длины резьбы расчетное значение конусности превышает экспериментальные значения, что может служить запасом точности при проектировании операции резбозерезерования. Предложенная система расчета может быть использована для проверки точности резбозерезерования при подборе или проектировании резьбовых фрез.

### Список источников

1. Волков Д.И., Сайкин С.А. Расчет силы резания при фрезеровании внутренней резьбы в жаропрочных сплавах // Вестник РГТА имени П. А. Соловьева. 2010. № 1(16). С. 145-150.
2. Косарев В.А. Моделирование процесса планетарной обработки внутренних резьб для исследования силовых параметров резбозерезерования // Вестник МГТУ «Станкин». 2011. № 3(15). С. 74-77.
3. Косарев В.А., Гречишников В.А., Косарев Д.В. Исследование силовых параметров при фрезеровании внутренних резьб с планетарным движением инструмента // СТИН. 2009. № 8. С. 19-22.
4. Сайкин С.А., Цветков Е.В., Толкачев А.В. Измерение силы резания и крутящего момента при резбозерезеровании // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 1(139). С. 24-30. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-1-24-30.
5. Карельский А.С. Повышение точности резбозерезерования на основе снижения силового взаимодействия инструмента и заготовки: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2022.



а



б

Рис. 6. Графики зависимости изменения конусности  $c$  экспериментальной (○) и расчетной предельной (●) от подачи на зуб  $S_z$  (а) и длины резьбы  $l$  (б) ( $d_p = 14$  мм;  $D = 16$  мм;  $P = 1$  мм;  $S_z = 0,1$  мм/зуб;  $V = 120$  м/мин;  $l_f = 0,1$  мм;  $\gamma_r = 10^\circ$ ;  $\alpha_r = 9^\circ$ ;  $h_3 = 0,08$  мм;  $\rho = 0,01$  мм;  $\Delta h = 0$ ;  $\omega = 10^\circ$ ;  $z = 5$ ;  $l_p = 32$  мм;  $\Delta \tau = 0^\circ$ ; направление резбозерезерования: встречное)

Fig. 6. Graphs of the dependence of the change in taper  $c$  of the experimental (○) and calculated limit (●) on the feed to the tooth  $S_z$  (a) and the thread length  $l$  (b) ( $d_p = 14$  mm;  $D = 16$  mm;  $P = 1$  mm;  $S_z = 0.1$  mm/tooth;  $V = 120$  m/min;  $l_f = 0.1$  mm;  $\gamma_r = 10^\circ$ ;  $\alpha_r = 9^\circ$ ;  $h_3 = 0.08$  mm;  $\rho = 0.01$  mm;  $\Delta h = 0$ ;  $\omega = 10^\circ$ ;  $z = 5$ ;  $l_p = 32$  mm;  $\Delta \tau = 0^\circ$ ; thread milling direction: counter)

6. Мальков О.В., Карельский А.С. Теоретический расчет составляющих силы резания при резьбофрезеровании // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 46-57.
7. Маслов А.Р., Тивирев Е.Г. Проектирование модульных инструментальных наладок с заданными точностью и жесткостью // Станкоинструмент. 2022. № 2(27). С. 82-86.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021613537, Российская Федерация. Система автоматизированного проектирования концевых гребенчатых резьбовых фрез для обработки внутренней резьбы / Мальков О.В., Павлюченков И.А.; правообладатели: Мальков О.В., Павлюченков И.А. Заявка № 2021612601; дата поступл. 24.02.2021; дата регистр. 10.03.2021; дата публикации 10.03.2021. Бюл.№3. 1 с.
9. Мальков О.В., Карельский А.С. Расчет силы резания при обработке внутренней резьбы гребенчатыми резьбовыми фрезами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 92-100.
10. Павлюченков И.А. Разработка системы проектирования резьбовых фрез с учетом обеспечения технологичности их изготовления: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2022. 16 с.
4. Saikin S.A., Tsvetkov E.V., Tolkachev A.V. Measurement of cutting force and torque during thread milling. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [High-tech technologies in mechanical engineering], 2023;(1(139)):24-30. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-1-24-30.
5. Karelskiy A.S. *Povyshenie tochnosti rezbofrezzerovaniya na osnove snizheniya silovogo vzaimodeystviya instrumenta i zagotovki: diss. ... kand. tekhn. nauk.* [Improving the accuracy of thread milling based on reducing the force interaction of the tool and the workpiece. Ph.D. dissertation]. Moscow, 2022.
6. Malkov O.V., Karelskiy A.S. Theoretical calculation of the components of the cutting force during thread milling. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2023;21(4):46-57.
7. Maslov A.R., Tivirev E.G. Design of modular tool adjustments with specified accuracy and rigidity. *Stankoinstrument* [Machine tools], 2022;(2(27)):82-86.
8. Malkov O.V., Pavlyuchenkov I.A. Computer-aided design system for end thread cutters for processing internal threads. Certificate of state registration of the computer program No. 2021613537, Russian Federation. Application No. 2021612601. Registered: 03.10.2021. Published: 03.10.2021.
9. Malkov O.V., Karelskiy A.S. Calculation of cutting force when processing internal threads with thread cutters. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2024;22(3):92-100.
10. Pavlyuchenkov I.A. *Razrabotka sistemy proektirovaniya rezbovyh frez s uchetom obespecheniya tekhnologichnosti ih izgotovleniya: avtoref. Dis. ... kand. tekhn. nauk.* Development of a design system for threaded cutters, taking into account the manufacturability. Extended abstract of Ph.D. dissertation. Moscow, 2022, 16 p.

# References

Поступила 24.10.2024; принята к публикации 04.02.2025; опубликована 30.06.2025  
Submitted 24/10/2024; revised 04/02/2025; published 30/06/2025

**Мальков Олег Вячеславович** – кандидат технических наук, доцент,  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.  
Email: malkov@bmstu.ru. ORCID 0000-0002-2373-4547

**Карельский Александр Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент,  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.  
Email: askarel@bmstu.ru. ORCID 0000-0002-8335-7579

**Oleg V. Malkov** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.  
Email: malkov@bmstu.ru. ORCID 0000-0002-2373-4547

**Alexandr S. Karelskiy** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.  
Email: askarel@bmstu.ru. ORCID 0000-0002-8335-7579



# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

## MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.771:666.982.24

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-97-110



### ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ И ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРЯЧЕКАТАНОГО АРМАТУРНОГО ПРОКАТА ИЗ СТАЛИ 25Г2С

Сычков А.Б.<sup>1</sup>, Завалищин А.Н.<sup>1</sup>, Атангулова Г.Я.<sup>2</sup>, Малашкин С.О.<sup>3</sup>, Шекшеев М.А.<sup>1</sup>, Касимов Д.Т.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

<sup>2</sup>ООО «ПП ТСС», Уфа, Россия

<sup>3</sup>ООО «Пластрифей», Пласт, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность).** В практике производства арматурного проката, как горячекатаного, так и термически упрочненного по схеме прерванной или прерывистой (технология термоциклирования) закалки с самоотпуском с использованием тепла предпрокатного нагрева в потоке сортовых станков, наблюдается ряд особенностей формирования микроструктуры и изменчивости во времени механических свойств арматуры. **Цель работы.** Установление закономерностей изменения свойств арматурного проката во времени. Разработка методов надежной аттестации металлопроката. **Используемые методы.** В качестве исследовательских методов применялось переиспытание свойств проката через определенные промежутки времени, а также определение микроструктуры проката. **Новизна.** Новизна заключается в установлении закономерностей изменения механических свойств арматурного проката во времени, прогнозировании достижения уровня характеристик в течение времени в зависимости от схемы производства – изготовление арматуры в горячекатаном состоянии и с термоупрочнением. **Результаты.** К физическим причинам изменчивости механических свойств во времени относятся: водородное обратимое охрупчивание углеродистых и низколегированных марганцем и кремнием сталей; водородное старение, особенно арматуры, произведенной в горячекатаном состоянии, заключающееся в снижении в таком металле значений предела текучести (в ряде случаев ниже нормативных значений) и отношения предела текучести к временному сопротивлению разрыву. Этому способствуют высокие температуры конца прокатки, обуславливающие формирование крупного аустенитного, а затем и действительного зерен. Водородное старение заключается в том, что в течение 2–3 недель от даты первичного испытания значения предела текучести и отношения предела текучести к временному сопротивлению разрыву снижаются на 55–60 МПа и до 0,55–0,50 соответственно, и обусловлено это тем, что в процессе диффузионного выделения водорода из микропор и «ловушек», в том числе структурных, за счет частичного снятия внутренних напряжений происходит освобождение дислокаций и локальное повышение пластичности. В дальнейшем по прошествии времени (до 1 года) значения предела текучести асимптотически приближаются к первоначальным значениям и выше. **Практическая значимость.** Если не учитывать поведение механических свойств во времени, то можно неправильно аттестовывать металлопродукцию при назначении ее под конкретный заказ потребителей. В горячекатаном состоянии возможно также аномальное структурообразование в арматуре – избирательная замена перлита на верхний и нижний бейнит с охрупчиванием металла. Предложена технология, исключаяющая такое явление, заключающееся в ускоренном охлаждении проката с измельчением аустенитного и, соответственно, действительного зерна проката.

**Ключевые слова:** горячекатаный и термически упрочненный арматурный прокат, механические свойства, изменчивость свойств во времени, водородное охрупчивание и старение, динамическая и собирательная рекристаллизация, аномальное структурообразование

© Сычков А.Б., Завалищин А.Н., Атангулова Г.Я., Малашкин С.О., Шекшеев М.А., Касимов Д.Т., 2025

#### Для цитирования

Особенности структурообразования и временные изменения механических свойств горячекатаного арматурного проката из стали 25Г2С / Сычков А.Б., Завалищин А.Н., Атангулова Г.Я., Малашкин С.О., Шекшеев М.А., Касимов Д.Т. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 97–110. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-97-110>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# FEATURES OF STRUCTURE FORMATION AND TEMPORARY CHANGES OF MECHANICAL PROPERTIES OF HOT-ROLLED REINFORCING BARS MADE OF STEEL 25G2S

Sychkov A.B.<sup>1</sup>, Zavalitshin A.N.<sup>1</sup>, Atangulova G.Ya.<sup>2</sup>, Malashkin S.O.<sup>3</sup>, Shecsheev M.A.<sup>1</sup>, Kasimov D.T.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Nosov Magnitogorsk state technical university, Magnitogorsk, Russia

<sup>2</sup>LLC «IE TSS», Ufa, Russia

<sup>3</sup>"Plastrifey" LLC, Plast, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** In the practice of production of reinforcing rolled products, both hot-rolled and thermally strengthened according to the scheme of interrupted or intermittent (thermal cycling technology) quenching with self-tempering using the heat of pre-roll heating in the flow of section mills, a number of features of the formation of the microstructure and variability over time of the mechanical properties of the reinforcement are observed.

**Objective.** Establishment of patterns of changes in the properties of reinforcing bars over time. Development of methods for reliable certification of rolled metal products. **Methods used.** Research methods used were retesting the properties of rolled products at certain intervals, as well as determining the microstructure of rolled products. **Newness.** The newness lies in the establishment of patterns of changes in the mechanical properties of reinforcing bars over time, predicting the achievement of the level of characteristics over time depending on the production scheme - the production of reinforcement in a hot-rolled state and with heat strengthening.

**Results.** The physical reasons for the variability of mechanical properties over time include: hydrogen reversible embrittlement of carbon and low-alloyed steels with manganese and silicon; hydrogen aging, especially of reinforcement produced in the hot-rolled state, which consists in reducing the yield strength values in such metal (in some cases below standard values) and the ratio of the yield strength to the temporary tensile strength. This is facilitated by high temperatures at the end of rolling, which cause the formation of large austenitic and then actual grains. Hydrogen aging is that within 2-3 weeks from the date of the initial test, the values of the yield strength and the ratio of the yield strength to the temporary tensile strength are significantly reduced by 55-60 MPa and to 0.55-0.50, respectively, and is due to the fact that in the process of diffusion release of hydrogen from micropores and "traps", including structural ones, due to the partial removal of internal stresses, dislocations are released and plasticity increases locally. Subsequently, over time (up to 1 year), the yield strength values asymptotically approach the initial values and are higher. **Practical Relevance.** If you do not take into account the behavior of mechanical properties over time, then you can incorrectly certify metal products when assigning them to a specific consumer order. In the hot-rolled state dynamic and collective recrystallization, abnormal structure formation, abnormal structure formation of the reinforcement is also possible - selective replacement of pearlite with upper and lower bainite with embrittlement of the metal. A technology is proposed that eliminates this phenomenon, consisting of accelerated cooling of the rolled product with refinement of the austenite and, accordingly, the actual grain of the rolled product.

**Keywords:** hot-rolled and thermally strengthened reinforcing bars, mechanical properties, variability of properties over time, hydrogen embrittlement and aging, dynamic and collective recrystallization, abnormal structure formation

## For citation

Sychkov A.B., Zavalitshin A.N., Atangulova G.Ya., Malashkin S.O., Shecsheev M.A., Kasimov D.T. Features of Structure Formation and Temporary Changes of Mechanical Properties of Hot-Rolled Reinforcing Bars Made of Steel 25G2S. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 97-110. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-97-110>

## Введение

Долгое время основным видом горячекатаного арматурного проката являлась арматура класса прочности 400 МПа – АIII (А400). Такую арматуру массово изготавливали из стали марок 25Г2С и 35ГС по ГОСТ 5781 [1], а из стали марки 25Г2С производили также термоупрочненную арматуру класса прочности Ат IV (Ат 600) по ГОСТ 10884 [2], замененные в настоящее время на ГОСТ 34028 [3]. При этом как в горячекатаном, так и термоупрочненном состояниях наблюдались неустойчивые механические свойства, имелась склонность к водородному охрупчиванию. В

горячекатаном состоянии прокат из анализируемых марок характеризовался очень низкими значениями предела текучести, в термоупрочненном состоянии наблюдались низкие значения пластичности.

Сталь марки 35ГС во многом аналогична марке 25Г2С. Однако недостатки этого типа сталей при производстве из них арматурного проката наиболее ярко проявляются на марке 25Г2С [4, 5]. Наблюдались аналогичные проблемы на марке 35ГС, прокатываемой в том числе в арматурных профилях номинальным диаметром 8 и 10 мм в бунтах на проволоочной линии. Тогда были получены избирательно неудовлетворительные механические характеристики,

не отвечающие требованиям ГОСТ 5781, а именно пониженная пластичность, хрупкий излом, высокая прочность, неудовлетворительный изгиб [6].

Наличие в сталях арматурного назначения водорода, поступившего в электродуговую сталь в процессе выплавки и внепечной доводки, достаточно высоких концентраций – 6-24 ppm, и в ряде случаев даже принудительным образом (количество водорода в жидком металле более его термодинамически возможного предельного растворения). Такое количество растворенного в стали водорода обуславливает явление водородного обратимого охрупчивания металла из марганец-кремнистой стали. Обратимая водородная хрупкость арматурных сталей присуща прокату, произведенному преимущественно с термоупрочнением. Водородное охрупчивание горячекатаной арматуры наблюдается значительно реже, чем термоупрочненного проката вследствие повышения внутренних напряжений [7-9].

Водородное старение приводит к тому, что в течение некоторого времени (2–3 недели) наблюдается при повторных испытаниях на растяжение существенное снижение значений предела текучести  $\sigma_T$  – примерно на 55 МПа (зачастую ниже требований стандартов и потребителей) и временного сопротивления разрыву  $\sigma_B$  – на 30 МПа, причем динамика снижения значений временного сопротивления разрыву проявляется в меньшей степени. Далее с увеличением выдержки металла во времени после минимальных значений наблюдается постепенное повышение значений  $\sigma_T$  и  $\sigma_B$ . Достижение значений предела текучести до уровня первичных испытаний в день производства арматурного проката происходит по истечении весьма долгого времени – примерно через 90–300 суток, причем это справедливо для средних и максимальных значений, минимальные значения могут только асимптотически приближаться к первичным значениям. Такое поведение металлопроката может обусловить ошибки при его аттестации и привести к отбраковке у потребителей металла по невыполнению требований к механическим свойствам.

Влияние на изменчивость механических свойств арматурного проката во времени оказывают также особенности деформирования горячекатаного металла на современных сортовых станах. К ним относится высокая скорость прокатки на непрерывных станах, что обуславливает высокую температуру конца прокатки (1000–1100°C), формируется крупное аустенитное зерно и после охлаждения проката наследственно крупное действительное зерно. Это обеспечивает высокий уровень прочностных характеристик:  $\sigma_B$ , пониженные значения предела текучести  $\sigma_T$  и отношения  $\sigma_T/\sigma_B$ . Кроме того, указанные выше условия способствуют, особенно для стали с повышенным содержанием марганца, развитию аномального структурообразования преимущественно в стали 25Г2С – переход от перлитного к бейнитному превращению, что приводит к охрупчиванию арматурного проката [7–9].

## Материалы и методы исследования

*Материал для исследования* – арматурный прокат периодического профиля номинальным диаметром 8–25 мм из низколегированной стали типа 25Г2С. Арматурный стержневой прокат прокатывали в линии 21-клетьевого сортового стана 320 со скоростью до 20 м/с и последующим интенсивным водяным охлаждением в 6-форсуночных секциях водяного охлаждения с рабочим давлением до 2 МПа, расположенных последовательно с разрывами между секциями для реализации как прерванного, так и прерывистого (процесс термоциклирования) охлаждения. В линии стана и участка поточной термической обработки установлены пирометры, на трассе интенсивного водяного охлаждения-упрочнения – измеритель магнитных свойств проката (ИМС). Проволочная линия – стан 150 комбинированного стана 320/150, также использовалась линия водяного охлаждения, скорость прокатки 60–80 м/с на арматурных профилях номинальным диаметром 8–12 мм в бунтах. Линия водяного охлаждения бунтового проката состоит из 0-й секции, установленной за клетью D перед проволочным блоком, за проволочным блоком установлены 6 форсуночных секций давлением воды до 1 МПа, для протягивания раскатов через секции водяного охлаждения используются 2 трайбера.

*Методики исследования.* Для определения химического состава применяют спектрометры ARL 3600, Spectrolab-M, углерода и серы – приборы типа AC и AS, азота общего и свободного – LECO T314 и LECO 436 соответственно, водорода – Strohein H-MAT. Для механических испытаний используют разрывные машины фирмы WPM (Германия) – EU 100, EDZ-40, машины завода «Точмашприбор» – P-20, P-50, IP-500 с программным обеспечением фирмы Walter und Bei.

Определение микротвердости осуществляется приборами PMT-3 и LECO-MAT 240. Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе Olympus IX70.

Методики испытаний и исследований изложены в следующей нормативной документации: ГОСТ 5639-82 [10], 8233-56 [11], ГОСТ 5640-2020 [12], ГОСТ 1497-84, применялись методы математической статистики.

Переиспытание свойств проката через определенные промежутки времени проводилось периодически через 1-3 недели.

## Полученные результаты и их обсуждение

*Особенности аномального структурообразования в горячекатаной арматуре из стали марки 25Г2С.* Горячекатаная арматура периодического профиля с номинальным диаметром 10, 16, 20 мм из стали марки 25Г2С на класс прочности АIII (A400) изготавливается в стержнях мерной длины, а арматура номинальным диаметром 8–12 мм – как в бунтах, так и в стержнях. Для исследования была выплавлена серия плавок с химическим составом, представленным в **табл. 1**, имеющим повышенное содержание марганца в пределах нормативных марочных значений.

Таблица 1. Химический состав опытных плавок из стали 25Г2С

Table 1. Chemical composition of experimental 25G2C steel melts

Номер плавки	Химические элементы, %					
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu
1	0,24	1,43	0,71	0,08	0,17	0,27
2	0,27	1,46	0,71	0,09	0,20	0,28
3	0,26	1,46	0,71	0,08	0,21	0,28
4	0,28	1,43	0,71	0,09	0,21	0,29

Арматурный прокат из стали 25Г2С производился в горячекатаном состоянии на современных скоростных мелкосортных и проволочных станах как в стержнях мерной длины, так и в бунтах. В зависимости от темпа прокатки, профилирующей, режима нагрева заготовок в нагревательных печах обеспечивается высокая температура конца прокатки, достигающая 1000–1100°C. Несмотря на то, что в межклетевых промежутках успевает пройти динамическая рекристаллизация, высокая температура прокатки при достаточном времени до водяного охлаждения способствует формированию крупного зерна аустенита и, соответственно, крупнозернистой ферритно-перлитной структуры с участками верхнего бейнита, снижающих в ряде случаев предел текучести и отношение предела текучести и временного сопротивления разрыву  $\sigma_T/\sigma_B$  ниже стандартных приемочных значений, в том числе и при испытаниях на изгиб. Эта структура обладает пластичностью существенно ниже нормативных значений [5, 13–17]. Также существует большой разброс всех механических характеристик ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$ ,  $\delta_5$ ).

Основной причиной неудовлетворительных свойств арматурного проката номинальным диаметром 8 и 10 мм из марки 25Г2С в бунтах является смена механизма структурообразования с перлитного на бейнитный (и даже мартенситный) вследствие развития динамической или даже собирательной рекристаллизации после горячей деформации. Смена механизма структурообразования обусловлена повышением (1000–1050°C) температуры конца прокатки и ускоренным охлаждением проката на воздухе, особенно вентиляторным воздухом. При повышении содержания упрочняющих элементов (например, марганца) механизм структурообразования также меняется выборочно с перлитного на бейнитный. При этом наблюдается повышенный разброс свойств, в ряде случаев с неудовлетворительным изгибом в холодном состоянии [5].

При высоких температурах конца прокатки (~1000°C и выше) в стали происходит интенсивный рост зерна, что влечет за собой пониженные значения  $\sigma_T$  и  $\sigma_T/\sigma_B$ . Эффективная температура конца прокатки равняется 870–900°C, это достигается естественным путем или с помощью незначительного (с малой скоростью) охлаждения проката водой, воздухом. Марганец, как и другие элементы, такие как хром, молибден, вольфрам, замедляет перлитное и ускоряет бейнитное превращение. В сталях, легированных выше-

указанными элементами, наблюдаются два максимума скорости изотермического распада аустенита (перлитное превращение формирует пластинчатые, а бейнитное – игольчатые структуры). Добавка легирующих элементов приводит к смещению области перлитного превращения вправо, также это может быть связано с микрофизической, междендритной ликвацией химических элементов. Значит, для того чтобы оно произошло, необходимо более мягкое охлаждение металла. В ряде случаев скорости охлаждения на воздухе уже достаточно для того, чтобы произошло бейнитное превращение [5, 18, 19].

**Динамика изменения механических свойств горячекатаного арматурного проката во времени.** Вдобавок к неблагоприятной структуре с образованием повышенного содержания бейнита большое влияние оказывает растворенный водород, особенно по истечении некоторого времени. Изменение механических характеристик арматурного проката номинальным диаметром 10–25 мм из стали 25Г2С во времени представлена на **рис. 1**. С истечением 1–2 недель пластичность проката частично или полностью повышается за счет процессов стабилизации структуры, связанной с релаксацией остаточных напряжений и выделением из стали диффузионным путем водорода [14–17].

Анализ показывает следующее. Примерно на 20 суток происходит снижение значений временного сопротивления разрыву – максимальная величина составляет минус 32 Н/мм<sup>2</sup>, среднее значение составило минус 12 МПа. В то же время имеются значения  $\sigma_B$  с противоположным знаком – плюс 8,3 МПа. По истечении от 20 до 100 дней происходит повышение минимальных значений до минус 14 МПа от первичных испытаний и относительная их стабилизация примерно на 150 суток. Далее идет монотонное повышение и к 310 суткам  $\sigma_B$  достигает своего первоначального уровня. Средние значения  $\sigma_B$  изменяются так же, как и минимальные – к 85 суткам достигают значений, полученных при первичных испытаниях, затем стабилизируются в период от 110 до 260 суток на одном уровне плюс 3,5 МПа от первоначального значения. Имеются также значения, при которых стабилизация достигается через 35 суток, к 320 суткам наблюдается плавное повышение  $\sigma_B$  до 14 МПа. Кривая максимальных значений  $\sigma_B$  более сложная – после инкубационного периода (15 суток) наблюдается рост  $\sigma_B$  до максимального значения плюс 27,5 МПа примерно через 55 суток, а затем монотонное их снижение до 17 МПа и повышение до 17–23 МПа к 330 суткам. Таким образом, полоса изменчивости (размах:  $\max - \min$ ), обусловленная явлением водородного старения, погрешностью испытаний и колебаниями технологических параметров, составляет: 41–45 МПа в период от 15 до 60 суток, затем этот разбег монотонно уменьшается до 31 МПа на 130 суток и до 17–23 МПа на 330 суток. То есть во времени идет процесс сходимости, выравнивания значений максимального и минимального отклонений.



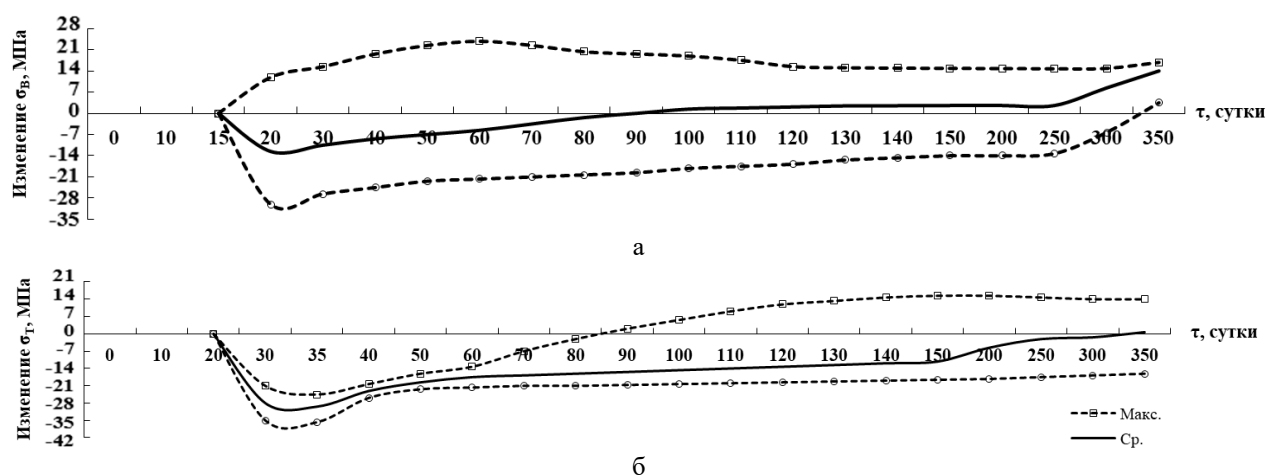


Рис. 1. Изменение во времени прочностных характеристик арматурного проката номинальным диаметром 10-25 мм класса прочности АП (А400) из стали марки 25Г2С по ГОСТ 5781:

а – временное сопротивление разрыву  $\sigma_b$ ; б – предел текучести  $\sigma_t$

Fig. 1. Time change in the strength characteristics of reinforcing bars with a nominal diameter of 10-25 mm of strength class АП (А400) made of steel of 25G2C grade according to GOST 5781:

a is temporary tear resistance  $\sigma_b$ ; б is yield strength  $\sigma_t$

Динамика изменения предела текучести  $\sigma_t$  во времени похожа на кривые изменчивости временного сопротивления разрыву  $\sigma_b$ , но имеет свои особенности: все три кривые (минимальное, среднее и максимальное отклонения от результатов первичных испытаний) параллельны друг другу и до 85 суток имеют минусовые отклонения, соответственно, наблюдается инкубационный период в течение 22 суток, после чего – достаточно резкое падение  $\sigma_t$ , минимум которого приходится на 33 сутки: минус 22 МПа, минус 28 МПа и минус 38 МПа соответственно. Затем кривая максимального отклонения (верхняя кривая на рис. 1, б) возрастает и стабилизируется на 60 сутки на уровне минус 19–17 МПа; средняя кривая – на 70 сутки на уровне минус 17 МПа, а затем монотонно поднимается до первоначального уровня на 330 суток; нижняя кривая (кривая минимальных минусовых отклонений) на 125 сутки достигает 14 МПа и сохраняется на этом уровне до 330 суток. Полоса изменчивости составляет 15 МПа на 33 сутки, затем возрастает на 28 МПа на 130 сутки и до 31 МПа к 330 суткам.

Изменение относительного удлинения  $\delta_{10}$  за 330 суток составило превышение от значений первичных испытаний, в среднем плюс 2–8% (абс.) за счет диффузионного выделения водорода из стали.

Варьирование механических характеристик ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_t$ ,  $\delta_{10}$  и отношения  $\sigma_t/\sigma_b$ ) во времени арматурного проката №12 из стали марки 25Г2С с высоким содержанием Mn (1,40–1,46%) (см. табл. 1) составило превышение значений  $\sigma_b$  через 60 суток над уровнем первичных испытаний с последующей стабилизацией. Прирост значений  $\sigma_b$  находился в пределах 46–63 МПа. Предел текучести  $\sigma_t$  имеет тенденцию к понижению. Минимальные значения  $\sigma_t$  наблюдаются на

15-е сутки (падение составляет 52–31 МПа), далее наблюдается незначительный (14 МПа) повышающий тренд  $\sigma_t$  в период с 15 до 60 суток. Относительное удлинение с течением времени увеличивается за счет выделения диффузионно подвижного водорода и стабилизируется примерно через 15 суток. Причем максимальные значения быстрее достигают уровня насыщения.

Отношение  $\sigma_t/\sigma_b$  в течение времени снижается весьма значительно и повторяет характер изменения  $\sigma_t$ , но более интенсивно, так как при уменьшении значений  $\sigma_t$  одновременно увеличиваются значения  $\sigma_b$ . Стабилизация значений отношения  $\sigma_t/\sigma_b$  наступает на 15 сутки. Снижение значений  $\Delta(\sigma_t/\sigma_b)$  достигает значений 0,07–0,10, минимальное абсолютное значение этого отношения равно 0,56. Для мелкозернистого горячекатаного арматурного проката это отношение должно быть близко к значению 0,66. Высокие значения  $\sigma_t/\sigma_b$  (до 0,76) при первоначальных испытаниях подтверждают протекание бейнитного превращения. Таким образом, в течение времени за счет выделения водорода и релаксационных процессов отношение  $\sigma_t/\sigma_b$  резко снижается.

Изменение механических свойств в течение времени объясняется протеканием водородного старения [15]. Водородное старение обусловлено следующим: в процессе вылеживания водород диффузионным путем выделяется в атмосферу и в микрополости – «ловушки», частично освобождая дислокации от атмосфер, и дислокации получают возможность двигаться с уменьшением плотности, соответственно, идет релаксация напряжений. Устанавливается новое равновесное состояние между плотностью дислокаций и концентрацией растворенного водорода. Со временем, как и в других рас-

творах внедрения, водород повторно сегрегирует на дислокации на другом концентрационном уровне, то есть происходит старение с повышением прочностных свойств.

Кроме того, наблюдается неоднородная разнотипная структура перлита (табл. 2), характерная для динамической рекристаллизации, понижающей значения  $\sigma_t$  и  $\sigma_r/\sigma_b$ . Сечение разбито на крупные участки (макротерна), внутри которых расположены колонии перлита разного размера. Для малых профилей диаметром 10 мм наблюдались колонии размером № 7–8, для более крупной арматуры номинальным диаметром 20 мм – № 6–9 (см. табл. 2). Наряду с водородонасыщенностью стали, такая структура обуславливала неоднородность свойств в одном и том же технологическом режиме и в плавке в целом. Последующее вылеживание проката на складе способствует релаксации внутренних напряжений 2-го рода и выравниванию свойств.

Металлографическое исследование образцов из различных профилей показал, что микроструктура поперечного сечения арматуры из стали 25Г2С представляет собой различные сочетания структурных составляющих (см. табл. 2). При неинтенсивном охлаждении и в горячекатаном состоянии наблюдается, наряду с ферритно-перлитными составляющими, верхний (перистый) бейнит в варьруемом количестве. В одних шлифах перлит полностью или почти полностью заменен бейнитом, в других – частично (см. табл. 2, химсостав – по табл. 1 (Mn = 1,47%, в среднем)).

При прокатке варьировали температуру самоотпуска от 810 до 890°C и, изменяя количество штанг в ячейке на холодильнике (от 2 до 6), пытались снизить скорость охлаждения проката на воздухе – это искусственное увеличение суммарного поперечного сечения раската.

После того как первичные испытания вышеуказанных заготовок показали неудовлетворительную пластичность, для отработки технологии были опробованы семь опытных режимов (табл. 3).

Уровень механических свойств и результаты металлографических исследований (см. табл. 2) подтвердили, что исходный аустенит распался при охлаждении по бейнитному механизму.

Разброс значений относительного удлинения  $\delta_5$  и неудовлетворительный изгиб в холодном состоянии не давал возможности говорить о достижении необходимого стабильного режима охлаждения проката. Видимо, другой основной причиной низкого значения  $\delta_5$  было явление водородного охрупчивания. При высоком содержании марганца в стали (см. табл. 1) увеличивается количество водородных ловушек и, соответственно, диффузионно-подвижный водород медленнее выделяется из проката [14].

При прокатке арматуры номинальным диаметром 16 мм учитывали, что более массивное поперечное сечение по сравнению с прокатом номинальным диаметром 10 мм должно медленнее остывать, а внутреннего тепла вполне достаточно для осуществления перлитного

превращения. Эксперимент продолжили на 6-ти новых режимах (табл. 4 и 5). При испытаниях наблюдался только один неудовлетворительный изгиб при самом низком значении  $\delta_5 = 8\%$ . Ни на одном из образцов не достигли требуемого значения  $\delta_5$  (не менее 14%). Только в VI режиме были обеспечены стабильные результаты на всех пробах  $\delta_5 = 12,5\%$  (на других режимах разброс  $\delta_5 = 3–4\%$ ), когда снизили скорость транспортирования штанг на холодильник. Учитывая полученные результаты, снизили скорость прокатки до 10,2 м/с, в ячейку на холодильнике размещали по 3 раската. В результате были получены высокие значения  $\delta_5$ , но значение предела текучести оказалось на нижнем пределе. Внутреннего тепла хватило на отпуск и рекристаллизацию, что привело к снижению  $\sigma_r$ .

Таким образом, для получения требуемых свойств арматурного проката из стали марки 25Г2С, соответствующих ГОСТ 5781, необходимы более низкие температуры конца прокатки и условия для замедленного охлаждения проката на воздухе для формирования ферритно-перлитной структуры.

Было предложено выполнить новую серию плавов с более низким содержанием марганца для уменьшения вероятности протекания бейнитного превращения и водородного охрупчивания. Снижение содержания марганца ниже нормативного значения при обеспечении заданных механических свойств оговорено в п. 2.4 ГОСТ 5781 [1].

Новая серия опытных плавов марки 25Г2С имела химический состав, приведенный в табл. 6.

По сравнению с табл. 1, содержание Mn (1,47%, среднее значение) в табл. 6 меньше (1,07 %, среднее значение) на 0,37 абс. %.

При прокатке арматуры номинальным диаметром 16 мм при различных режимах (см. табл. 4) были получены удовлетворительные результаты по всем свойствам, при этом скорость прокатки была поднята до 13,5 м/с.

Когда проводили опробование в арматуре номинальным диаметром 20 мм плавов с высоким содержанием марганца при различных режимах (табл. 7), с температурой самоотпуска 740–950°C, были получены практически одинаковые результаты. Требуемые по НТД значения  $\delta_5$  были обеспечены на отдельных образцах, но они были на нижнем пределе. Внутреннего тепла на арматуре номинальным диаметром 20 мм хватило, чтобы отпустить поверхностные слои проката с температуры охлаждения 740°C и получить ферритно-перлитную структуру, которая идентична горячекатаной.

В арматуре на плавках, имеющих химический состав, представленный в табл. 6, прокатанной в номинальных диаметрах 10, 16 и 20 мм, были получены удовлетворительные результаты на всех диаметрах, при этом температура самоотпуска была не выше 990°C (см. табл. 8).

Таблица 2. Микроструктура образцов арматурного проката из стали марки 25Г2С (см. табл. 1 и 6 – химсостав, в табл. 3-5, 7 – режимы горячей прокатки или термической обработки с подохлаждением)  
 Table 2. The microstructure of reinforcement samples made of steel of 25G2C grade (see Table 1 and Table 6 – chemical composition, Tables 3-5, 7 – modes of hot rolling or heat treatment with subcooling)

Диаметр, м	Номер режима	Механические свойства					Описание микроструктуры
		$\sigma_{\text{в}}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{\text{т}}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{\text{т}}/\sigma_{\text{в}}$	$\delta_5$ , %	Изгиб	
10	III	730	445	0,61	7,0	неуд.	Структура образца неоднородная, представляет собой смесь бейнита ( $\approx 70\%$ от общей площади шлифа), перлита, игольчатого феррита и феррита (табл. 3)
10	IV	770	470	0,61	5,8	неуд.	Структура неоднородная, смесь бейнита (около 75%), перлита, феррита и игольчатого феррита 1-го балла по ряду А. Величина перлитной колонии – № 8, 7 (табл. 3)
10	V	750	425	0,57	21,0	уд.	Структура неоднородная по сечению, смесь феррита, перлита, бейнита ( $\approx 15\%$ ). Величина перлитной колонии – № 8, 7. В месте разделения (слиптинг-процесс) наблюдается полосчатость ферритно-перлитной структуры 3-го балла по ряду Б (табл. 3)
16	V	742	509	0,69	18,8	уд.	Структура однородная, ферритно-перлитная. Соотношение феррита к перлиту – 60/40 %. Величина действительного зерна – № 8, 9, 7 (табл. 4, 5)
16	V	738	490	0,66	6,5	неуд.	Структура неоднородная по сечению и представляет собой смесь феррита, перлита, бейнита ( $\approx 20\%$ ), игольчатого феррита в разном соотношении по сечению. Величина перлитной колонии – № 8, 7, 9 (табл. 4, 5)
16	V	734	478	0,65	21,0	неуд.	Структура неоднородная по сечению, смесь бейнита ( $\approx 60\%$ ), феррита, перлита. В центре образца, в осевой зоне имеется резко очерченный участок аномальной структуры, состоящий из промежуточной фазы с вкраплением зерен перлита (табл. 5)
20	I	660	440	0,67	22,5	уд.	Структура ферритно-перлитная, однородная. Соотношение феррита к перлиту – 50/50%. Величина действительного зерна – № 8, 7. Имеется видманштеттов феррит, соответствующий баллу 1 по ряду А (табл. 8)
20	II	660	425	0,64	25,0	уд.	Структура ферритно-перлитная, однородная. Соотношение феррита к перлиту – 60/40%. Величина действительного зерна – № 7, 8, 6. Имеется незначительный видманштетт 0,5 балла (табл. 8)
20	I	730	460	0,63	15,5	уд.	Структура неоднородная, смесь перлита, феррита, бейнита ( $\approx 15\%$ ) и игольчатого феррита. Величина действительного зерна – № 7, 6 (табл. 7)
20	II	720	455	0,63	14,5	уд.	В макроструктуре образца имеется три зоны: поверхностная, переходная и сердцевина. Толщина поверхностного слоя и переходной зоны – 0,36–0,48 мм (по телу), 0,84–1,20 мм (по поперечному ребру). Микроструктура поверхностного слоя – продукты отпуска, переходной зоны – феррит, бейнит, перлит. Структура сердцевины – ферритно-перлитная, соотношение феррита к перлиту – 60/40%. Имеется незначительно количество бейнита ( $\approx 10\%$ ). Величина действительного зерна – № 8, 7, 9. Имеется незначительное количество видманштеттова феррита 0,5 балла (табл. 7)
20	III	730	460	0,63	17,0	уд.	Макроструктура и микроструктура поверхностного слоя и входной зоны аналогична образцу 10. Толщина поверхностного слоя составляет 0,30–0,48 мм (по телу), 0,72–0,98 мм (по продольным ребрам). Микроструктура сердцевины – ферритно-перлитная. Соотношение феррита к перлиту – 60/40%. Величина действительного зерна – № 7, 8, 6. Имеется незначительное количество бейнита ( $\approx 15\%$ ). Наблюдается видманштеттов феррит 1 балла (табл. 7)

Примечание. Микроструктура, ее полосчатость определяли по ГОСТ 5639, ГОСТ 5640 [10, 12].

Таблица 3. Технологические режимы производства арматуры диаметром 10 мм и ее механические свойства  
 Table 3. Technological modes of production of reinforcing bars with a diameter of 10 mm and mechanical properties

Номер режима	Номер секции, давление, МПа	Скорость прокатки, м/с	Температура за 8-й клетью, °C	Температура самоотпуска, ° C	σ <sub>в</sub> , Н/мм <sup>2</sup>	σ <sub>т</sub> , Н/мм <sup>2</sup>	σ <sub>т</sub> /σ <sub>в</sub>	δ <sub>5</sub> , %	Изгиб
I	P <sub>02</sub> = 0,5	13,2	1050	810-830	740	475	0,64	4,8	неуд.
					760	455	0,59	6,4	неуд.
					Повтор через 35 суток				
II	P <sub>02</sub> = 0,35	13,5	1040-1050	830-850	860	451	0,52	15,0	неуд.
					740	445	0,60	12,5	неуд.
					750	450	0,60	11,0	уд.
III	P <sub>02</sub> = 0,35	13,5	1050-1070	840-860	Повтор через 35 суток				
					846	462	0,55	14,0	неуд.
					836	451	0,54	16,0	неуд.
IV	P <sub>02</sub> = 0,35	13,5	1050-1070	840-860	730	445	0,61	10,0	уд.
					770	480	0,62	6,8	неуд.
					Повтор через 35 суток				
V	P <sub>02</sub> = 0,2	13,5	1060-1070	860-880	790	455	0,57	14,0	неуд.
					740	413	0,55	24,4	уд.
					780	470	0,60	13,5	неуд.
VI	P <sub>02</sub> = 0,2	13,5	1060-1070	860-880	800	455	0,57	8,8	неуд.
					Повтор через 35 суток				
					816	447	0,55	14	неуд.
VII	P <sub>02</sub> = 0,05	14,5	1060-1080	870-890	790	439	0,55	21	уд.
					730	415	0,56	21,5	уд.
					750	450	0,60	8,8	уд.
VIII	P <sub>02</sub> = 0,05	14,5	1060-1080	870-890	Повтор через 35 суток				
					816	455	0,58	17,8	уд.
					753	413	0,55	20,6	уд.
IX	P <sub>02</sub> = 0,1	15,0	1045-1065	870-885	740	415	0,56	23	уд.
					810	490	0,60	9,8	неуд.
					Повтор через 35 суток				
X	P <sub>02</sub> = 0,1	15,0	1045-1065	870-885	768	425	0,55	18,8	уд.
					767	422	0,55	19,6	уд.
					730	445	0,61	8,6	неуд.
XI	P <sub>02</sub> = 0,1	13,5	1050-1060	850-870	740	440	0,59	10,4	неуд.
					Повтор через 35 суток				
					823	455	0,55	16,4	неуд.
					833	450	0,54	17,6	неуд.

Таблица 4. Опытная прокатка стали марки 25Г2С в арматурном профиле номинальным диаметром 16 мм на класс прочности АIII по ГОСТ 5781-82 (химсостав – по табл. 1 ( $Mn = 1,47\%$ , в среднем))

Table 4. Experimental rolling of steel of 25G2C grade in a reinforcing profile with a nominal diameter of 16 mm for strength class AIII according to GOST 5781-82 (chemical composition – according to Table 1,  $Mn = 1.47\%$ , on average)

Номер режима	Секция, давление воды, МПа	Скорость прокатки, м/с	Температура за 8-й клетью, °C	Температура самоотпуска, °C	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_T/\sigma_B$	$\delta_5$ , %	Изгиб
I	$P_{2\text{кор.}} = 2,0$	13,5	1060-1080	800-810	720	445	0,62	11,5	уд.
					740	460	0,62	10,5	уд.
II	Горячекатаное состояние без охлаждения	13,5	1080-1090	960-980	750	480	0,64	11,0	уд.
					720	450	0,62	11,0	уд.
III	$P_{2\text{кор.}} = 0,2$	13,5	1080-1090	905-920	730	450	0,62	10,5	уд.
					730	450	0,62	9,0	уд.
IV	Подхлаждение за 18-й клетью	13,5	1080-1090	935-940	720	455	0,63	9,5	уд.
					740	460	0,62	12,0	уд.
V	Подхлаждение за 18-й клетью	13,5	1060-1080	940	740	450	0,61	9,0	уд.
					750	470	0,63	8,0	неуд.
VI	Подхлаждение за 18-й клетью	11,0	1045-1065	900-905	730	465	0,64	12,5	уд.
					730	445	0,61	12,5	уд.



Таблица 5. Опытная прокатка стали марки 25Г2С в арматурном профиле № 16 на класс прочности АIII по ГОСТ 5781-82 (повтор через 32 суток)

Table 5. Experimental rolling of steel of 25G2C grade in a reinforcing profile No. 16 for strength class AIII according to GOST 5781-82 (repeat after 32 days)

Номер режима	Количество секций	Скорость прокатки, м/с	Температура за 8-й клетью, °С	Температура самоотпуска, °С	$\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_t$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_t/\sigma_b$	$\delta_5$ , %	Изгиб
I	Подохлаждение за 16-й, 18-й клетями	10,2	1055-1065	885-895	690 700	400 415	0,58 0,59	10,5 8,0	уд. уд.
Повтор через 32 суток					735 731	478 421	0,65 0,58	21,0 17,5	уд. уд.
II	Подохлаждение за 16-й, 18-й клетями	10,2	1040-1060	880-890	700 710	410 415	0,59 0,58	21 21	неуд. неуд.
Повтор через 32 суток					807 802	418 421	0,65 0,58	16,3 16,8	уд. уд.
III	Горячекатаное состояние без охлаждения	10,2	1040-1055	920-930	690 690	405 410	0,58 0,59	13,0 захв.	уд. уд.
I	Горячекатаное состояние без охлаждения	13,5	1085-1095	970-990	650 650	425 420	0,65 0,65	23 23	уд. уд.
Повтор через 32 суток					650 656	410 408	0,63 0,62	29,4 28,0	уд. уд.
II	Подохлаждение за 16-й, 18-й клетями	13,5	1085-1095	935-950	650 640	425 430	0,65 0,67	21,5 20	уд. уд.
Повтор через 32 суток					662 663	414 418	0,63 0,63	28,5 30,0	уд. уд.
III	$P_{02}=0,2$	13,5	1070-1090	890-930	650 650	430 430	0,66 0,66	21 21	уд. уд.
Повтор через 32 суток					661 658	415 411	0,63 0,62	29,1 29,1	уд. уд.
IV	Подохлаждение за 16-й клетью	13,5	1070-1080	960-970	640 660	420 425	0,66 0,64	21,0 23	уд. уд.

Таблица 6. Химический состав стали 25Г2С – 2-я серия

Table 6. Chemical composition of steel of 25G2C grade – 2nd series

Химические элементы					
C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu
0,26	1,06	0,81	0,06	0,19	0,21
0,28	1,06	0,81	0,11	0,17	0,30
0,28	1,05	0,78	0,11	0,16	0,33
0,28	1,07	0,81	0,09	0,14	0,33
0,25	1,09	0,82	0,10	0,17	0,28

Таблица 7. Опытная прокатка стали марки 25Г2С в арматурном профиле № 20 на класс прочности АIII по ГОСТ 5781-82 (химсостав по табл. 6 ( $Mn = 1,07\%$  в среднем))Table 7. Experimental rolling of steel of 25G2C grade in reinforcing profile No. 20 for strength class AIII according to GOST 5781-82 (chemical composition – according to Table 6 ( $Mn = 1.07\%$  on average))

Номер режима	Количество секций	Скорость прокатки, м/с	Температура за 8-й клетью, °С	Температура за 20-й клетью, °С	Температура самоотпуска, °С	$\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_t$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_t/\sigma_b$	$\delta_5$ , %	Изгиб
I	Горячекатаное состояние без охлаждения	8,0	1055-1060	1000-1020	930-950	714 708	446 435	0,62 0,62	12,0 9,3	уд. уд.
Повтор через 30 суток						725 720	460 460	0,63 0,64	14,8 15,5	уд. уд.
II	$P_{1кор}=0,5$	8,66	1060-1070	1010-1020	766-780	710 714	460 468	0,65 0,66	14,0 12,6	уд. уд.
Повтор через 30 суток						720 720	450 460	0,63 0,64	19,1 14,3	уд. уд.
III	$P_{1кор}=1,0$	8,66	1060-1070	1010-1020	740-750	723 714	466 454	0,64 0,64	14,8 10,8	уд. уд.
Повтор через 30 суток						725 725	461 460	0,64 0,63	19,5 17,0	уд. уд.

Таблица 8. Прокатка стали марки 25Г2С в арматурных профилях № 10, 16 и 20 на класс прочности АIII по ГОСТ 5781-82

Table 8. Rolling of steel of 25G2C grade in reinforcing profiles No. 10, 16 and 20 for strength class AIII according to GOST 5781-82

Профилеразмер	Химический состав	Режим прокатки	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_T/\sigma_B$	$\delta_5$ , %	Изгиб
№ 10	C=0,27, Mn=1,11, Si=0,84	$P_{1\text{кор}} = 0,5/0,5$ , $V_{\text{пр}} = 13$ м/с $t_{\text{кот}} = 800-820^\circ\text{C}$	690 680	425 425	0,62 0,63	23,0 29,0	уд. уд.
№ 10	C=0,28, Mn=1,09, Si=0,79	$P_{1\text{кор}} = 0,5/0,5$ , $V_{\text{пр}} = 13$ м/с $t_{\text{кот}} = 800-820^\circ\text{C}$	670 680	450 450	0,67 0,66	29,0 25,0	уд. уд.
№ 10	C=0,27, Mn=1,07, Si=0,79	$P_{1\text{кор}} = 0,5/0,5$ , $V_{\text{пр}} = 13$ м/с $t_{\text{кот}} = 800-820^\circ\text{C}$	670 680	440 455	0,66 0,67	26,0 27,0	уд. уд.
№ 16	C=0,26, Mn=1,06, Si=0,81	$\Gamma/\text{К}$ , $V_{\text{пр}} = 13,5$ м/с $t_{\text{кот}} = 980-990^\circ\text{C}$	640 650	430 430	0,67 0,66	20,0 21,0	уд. уд.
№ 16	C=0,28, Mn=1,07, Si=0,81	$\Gamma/\text{К}$ , $V_{\text{пр}} = 13,5$ м/с $t_{\text{кот}} = 980-990^\circ\text{C}$	660 670	445 440	0,67 0,66	22,5 20,5	уд. уд.
№ 16	C=0,28, Mn=1,05, Si=0,82	$\Gamma/\text{К}$ , $V_{\text{пр}} = 13,5$ м/с $t_{\text{кот}} = 980-990^\circ\text{C}$	660 670	430 430	0,65 0,64	21,5 19,5	уд. уд.
№ 20	C=0,25, Mn=1,10, Si=0,83	$\Gamma/\text{К}$ , $V_{\text{пр}} = 8,66$ м/с $t_{\text{кот}} = 950-970^\circ\text{C}$	670 660	455 450	0,68 0,68	21,0 20,0	уд. уд.
№ 20	C=0,25, Mn=1,10, Si=0,83	Повтор через 30 суток	660 690	435 430	0,66 0,62	26,2 24,1	уд. уд.
№ 20	C=0,26, Mn=1,07, Si=0,81	$\Gamma/\text{К}$ , $V_{\text{пр}} = 8,66$ м/с $t_{\text{кот}} = 950-970^\circ\text{C}$	650 650	435 445	0,67 0,68	16,5 19,5	уд. уд.

Проведенные повторные испытания через месяц показали небольшое увеличение значений  $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$  и значительный рост  $\delta_5$  при обеспечении удовлетворительных изгибов (кроме арматуры номинальным диаметром 10 мм). Такое изменение механических свойств происходит при возврате и отпуске, когда стабилизируется кристаллическая структура и релаксируют остаточные напряжения.

При моделировании процессов искусственного возврата и отпуска путем нагрева до определенной температуры и медленном остывании проката хорошо заметно изменение механических свойств. При нагреве до  $250^\circ\text{C}$  происходят процессы возврата и стабилизации кристаллической структуры, поэтому наблюдается повышение прочностных свойств и пластичности. При нагреве до  $500^\circ\text{C}$  происходит средний отпуск проката и частично диффузионный распад бейнита на ферритно-карбидную смесь, а потому прочность несколько падает, а пластичность растет.

Другой причиной роста пластичности после вылеживания металла на складе является выделение водорода. При первичных испытаниях на некоторых изломах наблюдались водородные метки – хаотично расположенные в поперечном сечении точки белого цвета различного размера, что подтверждает водородную природу «провалов» по пластическим характеристикам. Взаимодействие водородного охрупчивания и высокого марганца привели к неудовлетворительным результатам при прокатке плавов с химическим составом по табл. 1 (среднее содержание марганца 1,47%). При прокатке арматуры номинальным диаметром 10 мм это взаимодействие привело к образованию микротрещин (водородные включения являлись концентраторами напряжений в напряженной структуре металла после прокатки), и даже выделение водорода после вылеживания

металла на складе не привело к удовлетворительным изгибам. Разрыв образцов наиболее вероятно произошел по микротрещинам от давления растворенного в металле водорода. В других профилеразмерах арматурного проката поперечное сечение было в меньшей степени напряжено (кольцо закалочных структур значительно меньше, чем в арматуре диаметром 10 мм), а потому повторные испытания показали положительные результаты.

После месячного вылеживания металла на адъюстаже сортового цеха на плавках с химическим составом по табл. 6 (среднее содержание марганца 1,07%) наблюдается небольшой рост значения временного сопротивления разрыву  $\Delta\sigma_B \approx 5-10$  Н/мм<sup>2</sup>, снижение предела текучести  $\Delta\sigma_T \approx 10-20$  МПа и увеличение относительного удлинения  $\Delta\delta_5 \approx 5-10$  абс.%, что объясняется стабилизацией кристаллической структуры и выделением водорода.

На плавках с химическим составом по табл. 1 после месячного вылеживания наблюдается следующее изменение механических свойств:

а) на образцах, отобранных с арматуры номинальным диаметром 20 мм, механические свойства изменились так же, как и у арматуры с химическим составом по табл. 6;

б) на образцах, отобранных с арматуры номинальным диаметром 10, 16 мм, произошло увеличение  $\sigma_B$  на 10-70 МПа (меньшее увеличение произошло на горячекатаной арматуре), однозначно сказать о том, в какую сторону изменилось  $\sigma_T$ , нельзя, значительно увеличилось  $\delta_5 \approx 10-15$  абс.%, так что выделение водорода на этих плавках сказалось в большей степени, так как его влияние на пластичность из-за высокого содержания марганца более значимо.

Таким образом, производство горячекатаного арматурного проката из стали марки 25Г2С характеризуется низкой надежностью обеспечения комплекса механических и эксплуатационных характеристик. Для арматуры из стали 35ГС наблюдаются аналогичные процессы, но выраженные в меньшей степени, чем для стали 25Г2С.

**Обратимое водородное охрупчивание арматурного проката.** Зачастую на горячекатаном арматурном прокате наблюдаются явления обратимого водородного охрупчивания [5, 14–17]. При этом относительное удлинение  $\delta_5$ ,  $\delta_{10}$  при насыщении стали водородом при первичных испытаниях может быть минимально – до 1 отн.% при норме для класса прочности 400 МПа – не менее 14 отн.% для  $\delta_5$ . Через 7–10 дней вылеживания значения относительного удлинения достигают нормативных значений за счет выделения водорода. Относительное удлинение достигает момента «насыщения» – максимального значения, и далее стабилизируется во времени. Максимальная пластичность соответствует удалению диффузионно-подвижного водорода в количестве 85–95%, а остаточное содержание водорода в стали не должно превышать 2 ppm. В дальнейшем содержание водорода снижается на 5–7% без изменения пластичности металла. Возможно также протекание процессов естественного старения, которое может быть положительным или отрицательным – при положительном старении увеличиваются прочностные характеристики и уменьшаются пластические, а при отрицательном старении при повышении прочности относительное удлинение или не изменяется, или даже возрастает [7–9, 15–17].

Водородная обратимая хрупкость теоретически обусловлена следующим: атомарный водород, переходящий в молекулярный и содержащийся в различного типа ловушках (остатки столбчатых кристаллов в микроструктуре проката, неметаллические включения, искажения кристаллической решетки по различным причинам и т.п.), создает остаточные напряжения, в результате которых и наблюдается явление хрупкости металла; после выделения диффузионно-подвижного водорода хрупкость исчезает.

**Изменчивость во времени механических свойств интенсивно упрочненного арматурного проката на класса прочности 500–1000 МПа.** В отличие от горячекатаного проката, на термомеханически упрочненной арматуре при формировании квазикомпозитной структуры, особенно после технологии ее термоциклирования, отсутствует явно выраженное изменение свойств во времени [20–23].

На **рис. 2** представлены графики изменчивости во времени (примерно год и три месяца) механических свойств термомеханически упрочненного арматурного проката среднего класса ( $\sigma_T = 460–600$  МПа) прочности из низкоуглеродистой стали. Усреднение опытных данных позволило выявить следующее:

– временное сопротивление разрыву и текучести имеют несущественный минимум (минус 4–7 МПа) и

(минус 7–9 МПа) соответственно; примерно через 70 суток наблюдается возврат значений к первоначальному уровню вследствие явления водородного старения с последующим ростом до плюс 5–10 МПа и стабилизации на этом уровне;

– относительное удлинение  $\delta_{10}$  за счет выделения водорода увеличивается на 2,5 абс.% и стабилизируется во времени.

На **рис. 3** представлена динамика механических характеристик арматурного проката класса прочности Ат800/Ат1000 в течение 8–12 месяцев. Анализ данных, представленных на **рис. 3**, показывает, что во времени высокопрочный термомеханически упрочненный прокат практически не разупрочняется, имеет максимум. Так, после выделения водорода предел прочности принимает истинное значение. Предел текучести имеет минимум, но его абсолютное значение меньше минимума, характерного для класса прочности 500, что объясняется менее интенсивным выделением водорода из термоупрочненного проката. Пластичность за счет выделения водорода значительно возрастает и стабилизируется на максимальном значении через некоторое время.

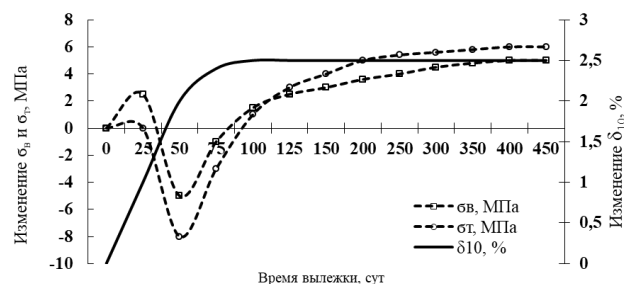


Рис. 2. Изменение временного сопротивления разрыву, предела текучести и относительного удлинения арматуры класса 500 во времени

Fig. 2. Change in the temporary tear resistance, yield strength, and elongation of 500 grade reinforcing bars over time

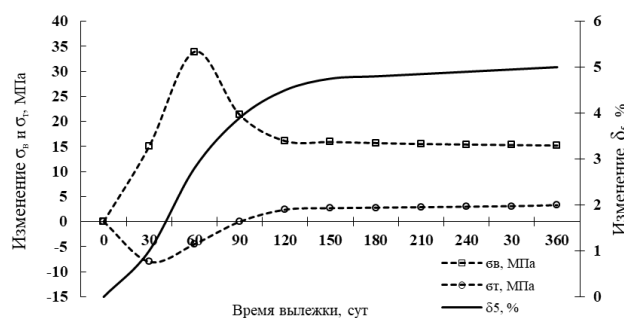


Рис. 3. Изменение во времени  $\sigma_b$ ,  $\sigma_T$  и  $\delta_5$  арматуры класса прочности Ат800/Ат1000

Fig. 3. Time variation of  $\sigma_b$ ,  $\sigma_T$  and  $\delta_5$  reinforcing bars of strength grade of Ат800/Ат1000

В случае низких значений  $\delta_5$  при первичных испытаниях прирост (см. **рис. 2, 3**) со временем будет весьма существенен ( $\Delta\delta_5 \approx 0–5$  абс. %).

### Заключение

1. Горячекатаный (температура конца прокатки – 1000–1100°C) арматурный прокат из низколегированной кремнемарганцевой стали 25Г2С и ускоренно охлажденный прокат (до 700–750°C и выше) имеют склонность к существенному разупрочнению во времени за счет водородного старения. Особенно изменяется предел текучести. Максимальное снижение  $\sigma_T$  происходит через 30–33 суток,  $\sigma_B$  – через 20 суток и составляет 55 МПа. После минимума в значениях  $\sigma_B$  и  $\sigma_T$  наблюдается их увеличение (в течение 30–60 дней) и стабилизация примерно на постоянном уровне (для  $\sigma_T$  – минус 17 МПа, а для  $\sigma_B$  наблюдаются даже плюсовые отклонения от первоначального значения).

2. Относительное удлинение имеет тенденцию к значительному увеличению и стабилизации – «насыщению» на определенном уровне для всех марок стали и классов прочности. Превышение  $\delta_{10}$ ,  $\delta_5$  составляет до 10–15 абс.% от результатов первичных испытаний. Причем для горячекатаного проката прирост относительного удлинения минимален (на уровне максимум 5 абс.%), а для термически упрочненного проката эффект усиливается с повышением прочности арматуры, когда при первичных испытаниях наблюдаются очень низкие значения пластических характеристик из-за явления обратимой водородной хрупкости.

3. С увеличением степени термического упрочнения прокат в меньшей степени разупрочняется во времени. Для классов прочности 500 значения пределов прочности и текучести с течением времени ведут себя одинаково, имеют минимум, а затем эти значения достигают результатов на день прокатки и незначительно его превышают. Для классов прочности Ат800/Ат1000 временное сопротивление разрыву не имеет минимума, а только максимум, предел текучести имеет незначительный минимум, что связано с менее интенсивным выделением водорода из-за большей степени термоупрочнения проката.

4. Изменение механических характеристик проката во времени связано с его структурным состоянием и степенью наводороживания стали. Выделение водорода приводит к явлению водородного старения. В крупнозернистых горячекатаных сталях это обуславливает разупрочнение, в слоистых квазикомпозитных структурах упрочненного проката – разупрочнения не происходит или выражено несущественно. При этом пластические свойства проката значительно увеличиваются.

5. Наблюдается в ряде случаев выборочная смена перлитного на бейнитное превращение, обусловленное явлением формирования крупнозернистой структуры и ликвационными процессами.

6. Технологические режимы охлаждения арматурного проката определяются химическим составом стали, заданным классом прочности, номинальным

диаметром арматурного проката, практически возможным уровнем скорости прокатки, определяющим время и скорость-интенсивность охлаждения и кинетику прохождения процессов закалки с самоотпуском. Для арматурного проката в бунтах определяющим из технологических параметров является температура виткообразования, как аналог температуры самоотпуска. Немаловажное значение имеет и вторая стадия воздушного охлаждения витков арматуры в бунтах, то есть интенсивность охлаждения витков проката вентиляторным воздухом блоков струйного охлаждения (БСО) линии «Стелмор».

### Список источников

- ГОСТ 5781-82. Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия. Статус на 2023 г. – заменен на ГОСТ 34028-2016. (Срок действия с 01.01.2018 г.).
- ГОСТ 10884-94. Сталь арматурная термомеханически упрочненная для железобетонных конструкций. Технические условия. Статус на 2023 г. – заменен на ГОСТ 34028-2016. (Срок действия с 01.01.2018 г.).
- ГОСТ 34028-2016. Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия. Срок действия с 01.01.2018 г. (Взамен ГОСТ 5781-82 и ГОСТ 10884-94).
- Производство арматурной стали / Л.Н. Левченко, А.С. Натапов, Л.Ф. Машкин и др. М.: Металлургия, 1984. 136 с.
- Сычков А.Б. Совершенствование технологии производства арматурного проката в бунтах // Сталь. 1995. № 2. С. 37-39.
- Арматурный прокат для железобетонных конструкций и изделий. Справочное пособие / Ю.Т. Худик, Е.М. Рыбалка, В.И. Большаков и др.; под ред. Ю.Т. Худика, А.В. Кекуха. Кривой Рог: СП «Мира», 2000. 115 с.
- Сычков А.Б., Жигарев М.А., Перчаткин А.В. Технологические особенности производства арматурного проката широкого назначения: монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО МГТУ, 2006. 499 с.
- Водородная эра в отечественной металлургии. Сообщение 1 / Ю.Л. Ершов, А.Г. Шакуров, В.М. Паршин, А.Г. Колесников, А.Ю. Шишов // Сталь. 2021. № 11. С. 50-56.
- Водородная эра в отечественной металлургии. Сообщение 2 / Ю.Л. Ершов, А.Г. Шакуров, В.М. Паршин, А.Г. Колесников, А.Ю. Шишов // Сталь. 2021. № 12. С. 48-57.
- ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. Срок действия с 01.01.1983 г.
- ГОСТ 8233-56. Сталь. Эталоны микроструктуры. Ограничение срока действия снято, протокол 4-93 (ИУС 4-94).
- ГОСТ 5640-2020. Сталь. Металлографические методы оценки микроструктуры проката стального плоского. Срок действия с 01.10.2021 г.
- Сычков А.Б., Олейник А.А., Жигарев М.А. Об изменчивости механических свойств проката во времени // Труды пятого конгресса прокатчиков, Череповец, октябрь 2003 г. М.: ОАО «Черметинформация», 2004. С. 264-269.



14. Термомеханическая обработка проката из непрерывно-литой заготовки малого сечения / В.В. Парусов, А.К. Белитченко, Н.А. Богданов, А.Б. Сычков, А.М. Нестеренко, О.В. Парусов. Запорожье: ЗГУ, 2000. 142 с.
15. Заика В.И., Кашченко Ю.А., Брехаря Г.П. Водород в промышленных сталях. Запорожье: ЗГУ, 1998. 192 с.
16. Стойкость против водородного растрескивания проката из конструкционной стали после термической обработки / В.В. Науменко, Л.В. Мунтин, О.А. Баранова, К.С. Сметанин // *Сталь*. 2021. № 3. С. 44-50.
17. Курбский С.В., Великоцкий Р.Е., Должиков В.В. Развитие представлений о механизме водородной хрупкости на основе теории молекулярного давления водорода // *Бюл. Черная металлургия*. 2023. Т. 79. № 6. С. 476-480.
18. Попов А.А., Попова А.Е. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. Справочник термиста. М.; Свердловск: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроит. лит., 1961. 431 с.
19. Формирование микроструктуры и механических свойств арматурного проката в бунтах из двух- и мультифазной стали / А.Б. Сычков, А.М. Нестеренко, А.Н. Завалищин, И.Г. Шубин, А.Б. Моллер, Б.А. Кулаков // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2023. Т. 21. № 4. С. 70-80.
20. Мадатян С.А. Массовые виды арматурной стали с композитной структурой для железобетонных конструкций // *Черная металлургия России и стран СНГ в XXI веке*. М.: Металлургия, 1994. Т. 4. С. 73-75.
21. Канаев А.Т., Богомолов А.В. Формирование градиентно-слоистой структуры при деформационно-термической обработке арматурной стали // *Сталь*. 2020. № 7. С. 67-72.
22. Принципы создания материалов с пространственным распределением макроскопических областей с различными физическими и механическими свойствами / Е.Н. Блинова, М.А. Либман, В.Н. Петровский, Е.В. Пименов // *Сталь*. 2021. № 11. С. 46-50.
23. Структурообразование и формирование механических и технологических свойств арматурного проката при точечной термической обработке / А.Б. Сычков, О.Н. Туполов, А.Н. Завалищин, Н.А. Баранов // *Черные металлы*. 2024. № 3 (1107). С. 47-55.
6. Khudik Yu.T., Rybalka E.M., Bolshakov V.I., Kekukh A.V. *Armurniy prokat dlya zhelezobetonnykh konstruktсий i izdeliy. Spravochnoe posobie* [Reinforcing bars for reinforced concrete structures and products. Reference book]. Krivoy Rog: Mira, 2000, 115 p. (In Russ.)
7. Sychkov A.B., Zhigarev M.A., Perchatkin A.V. *Tekhnologicheskie osobennosti proizvodstva armurnogo prokata shirokogo naznacheniya. Monografiya* [Technological features of the production of wide-purpose reinforcing bars. Monograph]. Magnitogorsk: State Educational Institution of Higher Professional Education MSTU, 2006, 499 p. (In Russ.)
8. Ershov Yu.L., Shakurov A.G., Parshin V.M., Kolesnikov A.G., Shishov A.Yu. Hydrogen era in domestic metallurgy. Report 1. *Stal* [Steel], 2021;(11):50-56. (In Russ.)
9. Ershov Yu.L., Shakurov A.G., Parshin V.M., Kolesnikov A.G., Shishov A.Yu. Hydrogen era in domestic metallurgy. Report 2. *Stal* [Steel], 2021;(12):48-57. (In Russ.)
10. State standard GOST 5639-82. Steels and alloys. Methods for detection and determination of grain size.
11. State standard GOST 10243-75. Steel. Methods of tests and estimation of macrostructure.
12. State standard GOST 5640-2020. Steel. Metallographic method for determination of microstructure of flat rolled product.
13. Sychkov A.B., Oleynik A.A., Zhigarev M.A. On the variability of the mechanical properties of rolled products over time. *Trudy pyatogo kongressa prokatchikov, Cherepovec, oktyabr 2003g.* [Proceedings of the fifth congress of distributors, Cherepovets, October 2003]. Moscow: JSC Chermet-informatsiya, 2004, pp. 264-269. (In Russ.)
14. Parusov V.V., Belitchenko A.K., Bogdanov N.A., Sychkov A.B., Nesterenko A.M., Parusov O.V. *Termomekhanicheskaya obrabotka prokata iz nepreryvno-liton zagotovki malogo secheniya* [Thermo-mechanical processing of rolled products from continuously cast blanks of small cross-section]. Zaporizhzhia: ZNU, 2000, 142 p.
15. Zaika V.I., Kashchenko Yu.A., Brekharya G.P. *Vodorod v promyshlennykh stalyah* [Hydrogen in industrial steels]. Zaporizhzhia: ZNU, 1998, 192 p.
16. Naumenko V.V., Muntin L.V., Baranova O.A., Smetanin K.S. Resistance to hydrogen cracking of rolled structural steel after heat treatment. *Stal* [Steel], 2021;(3):44-50. (In Russ.)
17. Kurbsky S.V., Velikotsky R.E., Dolzhikov V.V. Development of ideas about the mechanism of hydrogen fragility based on the theory of molecular pressure of hydrogen. *Byul. Chernaya metallurgiya* [Bull. Ferrous metallurgy], 2023;79(6):476-48. (In Russ.)
18. Popov A.A., Popova A.E. *Izotermicheskie i termokineticheskie diagrammy raspada pereohlazhdennogo austenita. Spravochnik termista* [Isothermal and thermokinetic diagrams of the decomposition of supercooled austenite. Heat treater's handbook]. Moscow, Sverdlovsk: State Scientific and Technical Publishing House of Mechanical Engineering Literature, 1961, 431 p. (In Russ.)
19. Sychkov A.B., Nesterenko A.M., Zavalishchin A.N., Shubin I.G., Moller A.B., Kulakov B.A. Formation of microstructure and mechanical properties of reinforcing bars in coils made of two- and multiphase steel. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2023;21(4):70-80. (In Russ.)

## References

1. State standard GOST 5781-82. Hot-rolled steel for reinforcement of ferroconcrete structures. Specifications. Status for 2023 - replaced by GOST 34028-2016.
2. State standard GOST 10884-94. Thermomechanically hardened steel bars for reinforced concrete constructions. Specifications. Status for 2023 - replaced by GOST 34028-2016.
3. State standard GOST 34028-2016. Reinforcing rolled products for reinforced concrete constructions. Specifications.
4. Levchenko L.N., Natapov A.S., Mashkin L.F. et al. *Proizvodstvo armaturnoy stali* [Production of reinforcing steel]. Moscow: Metallurgy, 1984, 136 p. (In Russ.)
5. Sychkov A.B. Improvement of technology for the production of reinforcing bars in coils. *Stal* [Steel], 1995;(2):37-39. (In Russ.)

20. Madatyan S.A. Massovye vidy armaturnoy stali s kompozitnoy strukturoy dlya zhelezobetonnykh konstruktсий [Mass types of reinforcing steel with a composite structure for reinforced concrete structures]. V knige: *Chernaya metallurgiya Rossii i stran SNG v XXI veke* [In the book: Ferrous metallurgy of Russia and the CIS countries in the 21st century]. Moscow: Metallurgy, 1994, .vol. 4, pp. 73-75. (In Russ.)
21. Kanaev A.T., Bogomolov A.V. Formation of a gradient-layered structure during deformation-thermal treatment of reinforcing steel. *Stal* [Steel], 2020;(7):67-72. (In Russ.)
22. Blinova E.N., Libman M.A., Petrovsky V.N., Pimenov E.V. Principles of creating materials with a spatial distribution of macroscopic regions with different physical and mechanical properties. *Stal* [Steel], 2021;(11):46-50. (In Russ.)
23. Sychkov A.B. Tulupov O.N., Zavalishchin A.N., Baranov N.A. Structure formation and development of mechanical and technological properties of reinforcing bars during in-line heat treatment. *Chernye metally* [Ferrous Metals]. 2024;3(1107):47-55.

Поступила 11.04.2024; принята к публикации 05.05.2025; опубликована 30.06.2025

Submitted 11/04/2024; revised 05/05/2025; published 30/06/2025

**Сычков Александр Борисович** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры литейных процессов и материаловедения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: absychkov@mail.ru. ORCID 0000-0002-0886-1601; Reseacher ID E-4516-2016

**Завалищин Александр Николаевич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры литейных процессов и материаловедения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: zaval1313@mail.ru. ORCID 0000-0003-0955-8425

**Атангулова Гюзель Ягафаровна** – начальник лаборатории, ООО «Промышленное предприятие Турбинаспецсервис» («ПП ТСС»), Уфа, Россия. Email: 174kamalova@mail.ru.

**Малашкин Сергей Олегович** – финансовый контролер, ООО «Пластрифей», Пласт, Россия. Email: malashkinserzh@yandex.ru.

**Шекшеев Максим Александрович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: shecsheev@yandex.ru. ORCID 0000-0003-4790-2821

**Касимов Данис Тагирович** – студент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: calennccall@gmail.com

**Alexander B. Sychkov** – DrSc (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Foundry Processes and Materials Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: absychkov@mail.ru. ORCID 0000-0002-0886-1601; Reseacher ID E-4516-2016

**Aleksandr N. Zavalishchin** – DrSc (Eng.), Professor, Professor of the Department of Foundry Processes and Materials Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: zaval1313@mail.ru. ORCID 0000-0003-0955-8425

**Guzel Ya. Atangulova** – Head of Laboratory, Industrial Enterprise “Turbine special service” (IE TSS) LLC, Ufa, Russia. Email: 174kamalova@mail.ru.

**Sergey O. Malashkin**– Financial Controller, "Plastrifey" LLC, Plast, Russia. Email: malashkinserzh@yandex.ru

**Maksim A. Sheksheev** – PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the department of machine and technology of pressure processing and mechanical engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: shecsheev@yandex.ru. ORCID 0000-0003-4790-2821

**Danis T. Kasimov** – Student, Department of Foundry Processes and Materials Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: calennccall@gmail.com.



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 669.017  
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-111-118

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СПЛАВОВ M(CR30W5C1.5)

Бодров Е.Г.<sup>1</sup>, Шабалина Д.А.<sup>2</sup>, Самодурова М.Н.<sup>2</sup>, Киселев М.В.<sup>3</sup>, Зайцева О.В.<sup>2</sup>, Трофимов Е.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «КОНАР», Челябинск, Россия

<sup>2</sup>Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

<sup>3</sup>Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

**Аннотация.** Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки экономически доступных материалов, сочетающих высокую износостойкость, термостойкость и стабильность, для замены дорогостоящих кобальтовых сплавов в условиях растущих требований современного промышленного производства. Цель работы – комплексное термодинамическое моделирование температурной зависимости фазового состава, кристаллизации и изменения плотности высокоэнтропийных сплавов системы M(Cr30W5C1.5) (M = Co, Fe, Ni, Al, Mn) для оптимизации их эксплуатационных характеристик. Изучение возможностей влияния состава матрицы M на формирование кристаллических структур (ГЦК/ОЦК), карбидообразование ( $M_7C_3/M_{23}C_6$ ) и характер изменения плотности позволило выявить ключевые закономерности этих процессов. Методы включали подход CALPHAD с применением программного комплекса Thermo-Calc (версия 2024a) и базы данных TCHEA5, а также моделирование неравновесной кристаллизации сплавов по методу Шейла. Результаты показали, что состав матрицы M определяет доминирующую кристаллическую структуру: в алюминийсодержащих системах стабилизируется ОЦК-фаза, тогда как в многокомпонентных сплавах на основе Co, Ni, Mn и Fe формируется матрица со структурой ГЦК (за исключением системы, в которой Fe является основой матрицы). Выявлены различия в карбидообразовании: в матрице на основе Co преобладает карбид  $M_7C_3$ , в большинстве других систем –  $M_{23}C_6$ , а в системах MnCoNiFe(Cr30W5C1.5) и CoNiFe(Cr30W5C1.5) наблюдается сосуществование разных карбидов. Моделирование плотности выявило, что алюминийсодержащие сплавы обладают на 20–25% меньшей плотностью и повышенным риском образования дефектов при кристаллизации, тогда как для систем на основе Co, Ni и Fe следует ожидать меньшего количества дефектов. Практическая значимость работы заключается в обнаружении перспективных систем MnCoNiFe(Cr30W5C1.5) и CoNiFe(Cr30W5C1.5), сочетающих стабильную ГЦК-матрицу, возможность управляемого карбидообразования и умеренные изменения плотности при кристаллизации, что актуально для создания новых сплавов, которые могут найти применение в аэрокосмической, энергетической и машиностроительной отраслях.

**Ключевые слова:** CALPHAD, модель Шейла, высокоэнтропийные сплавы, кристаллизация, ГЦК/ОЦК-структуры, плотность сплавов

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, номер проекта № 075-15-2022-1243.*

© Бодров Е.Г., Шабалина Д.А., Самодурова М.Н., Киселев М.В., Зайцева О.В., Трофимов Е.А., 2025

### Для цитирования

Моделирование фазового состава и кристаллизации сплавов M63.5Cr30W5C1.5 / Бодров Е.Г., Шабалина Д.А., Самодурова М.Н., Киселев М.В., Зайцева О.В., Трофимов Е.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 111-118. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-111-118>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

## MODELING OF PHASE COMPOSITION AND CRYSTALLIZATION OF M(Cr30W5C1.5) ALLOYS

Bodrov E.G.<sup>1</sup>, Shabalina D.A.<sup>2</sup>, Samodurova M.N.<sup>2</sup>, Kiselev M.V.<sup>3</sup>, Zaitseva O.V.<sup>2</sup>, Trofimov E.A.<sup>2</sup><sup>1</sup>JSC KONAR, Chelyabinsk, Russia<sup>2</sup>South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia<sup>3</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

**Abstract.** The relevance of the work is due to the need to develop economically accessible materials that combine high wear resistance, thermal stability, and reliability to replace expensive cobalt-based alloys in the conditions of growing demands of modern industrial production. The objective of the work is a comprehensive thermodynamic modeling of the temperature dependence of phase composition, crystallization, and density changes of high-entropy alloys of the M(Cr30W5C1.5) system (M = Co, Fe, Ni, Al, Mn) to optimize their performance characteristics. The study of how the matrix M composition influences the formation of crystal structures (FCC/BCC), carbide formation ( $M_7C_3/M_{23}C_6$ ), and density variations allowed us to identify key patterns of these processes. The methods used included the CALPHAD approach with the Thermo-Calc software package (version 2024a) and the TCHEA5 database, as well as non-equilibrium crystallization modeling of alloys using the Scheil method. The results showed that the matrix M composition determines the dominant crystal structure: BCC phases are stabilized in aluminum-containing systems, while multi-component alloys based on Co, Ni, Mn, and Fe form an FCC matrix (except for systems where Fe is the basis of the matrix). Differences in carbide formation were revealed:  $M_7C_3$  carbides predominate in the Co-based matrix,  $M_{23}C_6$  predominates in most other systems, and coexistence of different carbides is observed in the MnCoNiFe(Cr30W5C1.5) and CoNiFe(Cr30W5C1.5) systems. Density modeling showed that aluminum-containing alloys have 20–25% lower density and an increased risk of defect formation during crystallization, whereas systems based on Co, Ni, and Fe are expected to exhibit fewer defects. The practical relevance of the work lies in identifying promising MnCoNiFe(Cr30W5C1.5) and CoNiFe(Cr30W5C1.5) systems, which combine a stable FCC matrix, controlled carbide formation capabilities, and moderate density changes during crystallization. This is relevant for creating new alloys that can be applied in aerospace, energy, and mechanical engineering industries.

**Keywords:** CALPHAD, Scheil model, high-entropy alloys, crystallization, FCC/BCC structures, alloy density

*The work was carried out with the financial support of the Russian Federation represented by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project number No. 075-15-2022-1243.*

**For citation**

Bodrov E.G., Shabalina D.A., Samodurova M.N., Kiselev M.V., Zaitseva O.V., Trofimov E.A. Modeling of Phase Composition and Crystallization of M63.5Cr30W5C1.5 alloys. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 111–118. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-111-118>

**Введение**

Современные требования к материалам, используемым в промышленности, сельском хозяйстве и энергетике, диктуют необходимость сочетания высокой износостойкости, термостойкости и экономической доступности. В частности, это актуально для технологий наплавки, где ключевыми критериями являются долговечность, устойчивость к абразивному износу и иногда способность сохранять свойства при значительных температурах. Традиционно в таких условиях применяются кобальтохромовые сплавы, такие как стеллиты, чья микроструктура, образуемая карбидами, распределёнными в кобальтовой матрице, обеспечивает выдающуюся износостойкость, в том числе и при повышенных температурах [1, 2]. Однако их высокая стоимость, обусловленная содержанием дефицитного кобальта, а также сложность обработки ограничивают их массовое применение [3, 4]. Альтернативой служат сплавы с подобной структурой на

основе железа (например, сормайт [5]), которые дешевле, но уступают в термостойкости и долговечности [6]. Это создает потребность в разработке новых систем, объединяющих преимущества обоих классов материалов.

В настоящее время одним из перспективных направлений в создании новых металлических материалов стали высокоэнтروпийные сплавы (ВЭС), характеризующиеся наличием многокомпонентной матрицы, ни один из компонентов которой не преобладает в её составе. Уникальные свойства некоторых представителей этой группы сплавов, такие как высокая прочность, термическая стабильность и коррозионная стойкость, объясняются эффектом высокой конфигурационной энтропии, что, помимо прочего, приводит к затруднениям диффузии и росту зерен [7–10].

Исследования последних лет позволяют предположить, что использование в наплавочных материалах вместо кобальтовой матрицы смеси элементов с сопоставимым (близким к эквимольному) присут-



ствием Fe, Co и Ni (наряду с карбидообразующими элементами – Cr, W, C) может позволить достичь сопоставимых со стеллитами характеристик и при этом снизить себестоимость материала. В частности, сплав  $\text{FeCoCrNiW}_{0,3} + 5 \text{ ат.}\% \text{ C}$  благодаря формированию карбидов Cr и W в аустенитной матрице [11] демонстрирует износостойкость, твёрдость и жаростойкость, характерные для кобальтовых сплавов.

В настоящей работе исследуются сплавы системы  $\text{M}(\text{Cr}_{30}\text{W}_{5}\text{C}_{1.5})$ , где М представляет собой комбинацию от 1 до 4 металлов из следующего списка: Co, Fe, Ni, Al, Mn. Числа в скобках в используемых далее формулах конкретных сплавов типа  $\text{AlCoNiFe}(\text{Cr}_{30}\text{W}_{5}\text{C}_{1.5})$  отражают мас. % компонентов. Количественное отношение элементов, образующих основу матрицы, отражают индексы у этих элементов: для  $\text{AlCoNiFe}(\text{Cr}_{30}\text{W}_{5}\text{C}_{1.5})$ ,  $\text{MnCoNiFe}(\text{Cr}_{30}\text{W}_{5}\text{C}_{1.5})$  и  $\text{CoNiFe}(\text{Cr}_{30}\text{W}_{5}\text{C}_{1.5})$  это эквимолярное отношение, а для  $\text{Al}_2\text{CoNiFe}(\text{Cr}_{30}\text{W}_{5}\text{C}_{1.5})$  – количество Al в два раза превышает количества других элементов, образующих матрицу.

Выбор компонентов матрицы обусловлен стремлением создать сложный твёрдый раствор, сочетающий достоинства разных по свойствам элементов и при этом обладающий преимуществами, связанными с эффектами высокой энтропии. При этом хром, вольфрам и углерод обеспечивают формирование карбидных фаз, критически важных для износостойкости [12–14]. Подобные системы ранее изучались в контексте создания многокомпонентных сплавов, где вариация состава М позволяла управлять фазовым составом и механическими свойствами [15–18]. Однако специфика кристаллизации и распределения фаз в системах с переменным количеством основных элементов (М) до настоящего времени остаётся недостаточно изученной.

Таким образом, в основе работы лежит предположение о том, что комбинация нескольких металлов в матрице М позволит оптимизировать баланс между твердостью и пластичностью за счет синергетического влияния на формирование твёрдорастворной металлической фазы и карбидов.

Предполагается, что модель Шейла, успешно используемая для моделирования кристаллизации традиционных сплавов, может быть применена для высокоэнтروпийных систем, обеспечив приемлемое качество прогнозирования фазового состава закристаллизовавшегося металла.

Также предполагается, что изменение плотности образцов исследуемых сплавов при изменении температуры и в том числе в процессе кристаллизации коррелирует с фазовым составом, а понимание того, как будет меняться плотность, имеет большое значение для предсказания вероятности образования дефектов при наплавке.

Целью настоящего исследования стало комплексное термодинамическое моделирование температурной зависимости фазового состава, кристаллизации и зависимости изменения плотности от температуры для ряда сплавов вида  $\text{M}(\text{Cr}_{30}\text{W}_{5}\text{C}_{1.5})$ .

## Материалы и методы исследования

CALPHAD основан на минимизации энергии Гиббса системы, что позволяет прогнозировать устойчивые фазы, их количественные соотношения и температурные закономерности реализации фазовых превращений.

В рамках исследования фазового состава и процессов кристаллизации сплавов изучены системы с различными комбинациями металлов-матриц:  $\text{AlCoNiFe}$ ,  $\text{Al}_2\text{CoNiFe}$ ,  $\text{MnCoNiFe}$ ,  $\text{CoNiFe}$ , а также моноэлементные матрицы (Co, Ni, Fe) с фиксированным содержанием Cr, W и C:  $\text{AlCoNiFe}(\text{Cr}_{30}\text{W}_{5}\text{C}_{1.5})$ ,  $\text{Al}_2\text{CoNiFe}(\text{Cr}_{30}\text{W}_{5}\text{C}_{1.5})$ ,  $\text{MnCoNiFe}(\text{Cr}_{30}\text{W}_{5}\text{C}_{1.5})$  и  $\text{CoNiFe}(\text{Cr}_{30}\text{W}_{5}\text{C}_{1.5})$ ,  $\text{Co}(\text{Cr}_{30}\text{W}_{5}\text{C}_{1.5})$ ,  $\text{Ni}(\text{Cr}_{30}\text{W}_{5}\text{C}_{1.5})$  и  $\text{Fe}(\text{Cr}_{30}\text{W}_{5}\text{C}_{1.5})$ . Термодинамическое моделирование проведено с использованием методов CALPHAD, реализованных в программном комплексе Thermo-Calc (версия 2024a). Расчеты равновесных составов выполнялись для температурного интервала 400–1600°C с применением специализированной базы данных TCHEA5, адаптированной для высокоэнтропийных сплавов.

Также выполнено моделирование изменения плотности образцов в том же температурном диапазоне для оценки возможной усадки металла. Моделирование изменений плотности проводилось с учетом всех фазовых переходов, характерных для изученного интервала температур, включая плавление/кристаллизацию, что позволило оценить риски дефектообразования при технологических процессах.

Для анализа неравновесной кристаллизации исследуемых материалов использована модель Шейла, учитывающая отсутствие диффузии в твердой фазе. Данный подход интегрирован в Thermo-Calc. Использование этой модели обеспечивает учет локальных равновесий на границе раздела фаз при постепенном затвердевании.

Результаты равновесного и неравновесного моделирования сопоставлены для выявления различий, обусловленных кинетическими ограничениями.

## Полученные результаты и их обсуждение

Термодинамическое моделирование равновесных состояний сплавов системы  $\text{M}(\text{Cr}_{30}\text{W}_{5}\text{C}_{1.5})$  выявило зависимость фазового состава от температуры и состава матрицы. Для многокомпонентных систем  $\text{AlCoNiFe}(\text{Cr}_{30}\text{W}_{5}\text{C}_{1.5})$  и  $\text{Al}_2\text{CoNiFe}(\text{Cr}_{30}\text{W}_{5}\text{C}_{1.5})$  доминирующей твёрдой металлической фазой в интересующем нас интервале температур является твёрдый раствор с ОЦК-структурой (рис. 1, а и б), тогда как в системах  $\text{MnCoNiFe}(\text{Cr}_{30}\text{W}_{5}\text{C}_{1.5})$ ,  $\text{CoNiFe}(\text{Cr}_{30}\text{W}_{5}\text{C}_{1.5})$ ,  $\text{Co}(\text{Cr}_{30}\text{W}_{5}\text{C}_{1.5})$  и  $\text{Ni}(\text{Cr}_{30}\text{W}_{5}\text{C}_{1.5})$  преобладает ГЦК-фаза (рис. 1, в–е). Для системы  $\text{Fe}(\text{Cr}_{30}\text{W}_{5}\text{C}_{1.5})$  наблюдается стабильность структуры ОЦК во всем температурном диапазоне (рис. 1, ж).

Карбидные фазы  $\text{M}_7\text{C}_3$  и  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  демонстрируют вариативность: в алюминийсодержащих системах доминирует  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  (20–30 об.%), тогда как в кобальтовой матрице ( $\text{Co}(\text{Cr}_{30}\text{W}_{5}\text{C}_{1.5})$ ) преобладает  $\text{M}_7\text{C}_3$  (см. рис. 1). Для  $\text{MnCoNiFe}(\text{Cr}_{30}\text{W}_{5}\text{C}_{1.5})$  и

CoNiFe(Cr30W5C1.5) характерно сосуществование обеих карбидных фаз, соотношение между которыми зависит от температуры.

Моделирование изменения плотности (рис. 2) показало, что алюминийсодержащие системы имеют на 20–25% меньшую плотность по сравнению с другими

сплавами. Во всех системах наблюдается скачкообразное снижение плотности при плавлении (выше 1200°C), а максимальное изменение плотности  $\Delta\rho$  при кристаллизации характерно для алюминийсодержащих композиций, что указывает на повышенный риск образования дефектов.

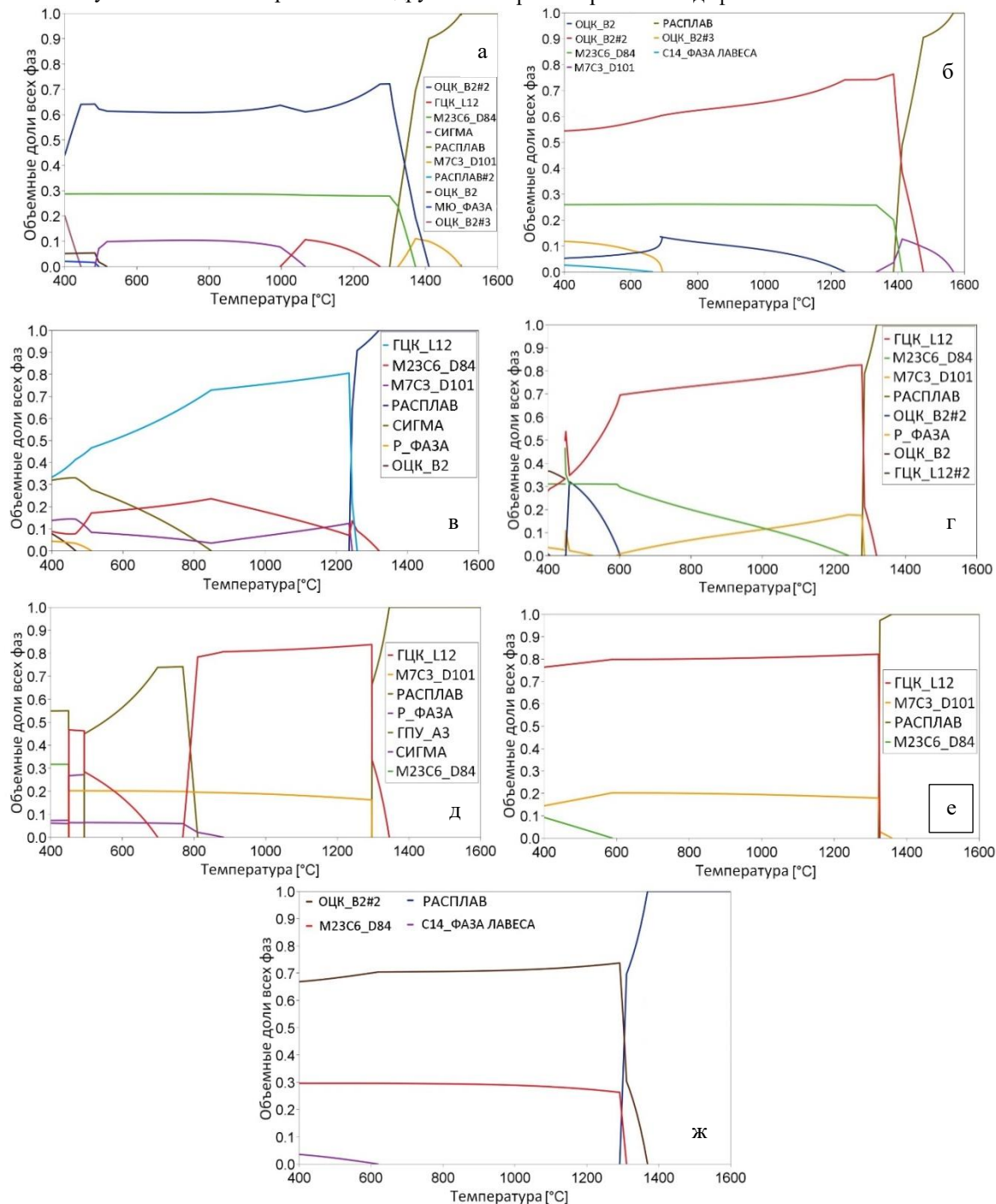


Рис. 1. Равновесные фазовые составы систем M(Cr30W5C1.5) в интервале 400–1600°C:

а – AlCoNiFe(Cr30W5C1.5); б – Al<sub>2</sub>CoNiFe(Cr30W5C1.5); в – MnCoNiFe(Cr30W5C1.5);

г – CoNiFe(Cr30W5C1.5); д – Co(Cr30W5C1.5)/Stellite 6; е – Ni(Cr30W5C1.5); ж – Fe(Cr30W5C1.5)

Fig. 1. Equilibrium phase compositions of the M(Cr30W5C1.5) systems in the range of 400–1600°C:

a is AlCoNiFe(Cr30W5C1.5); б is Al<sub>2</sub>CoNiFe(Cr30W5C1.5); в is MnCoNiFe(Cr30W5C1.5);

г is CoNiFe(Cr30W5C1.5); д is Co(Cr30W5C1.5)/Stellite 6; е is Ni(Cr30W5C1.5); ж is Fe(Cr30W5C1.5)

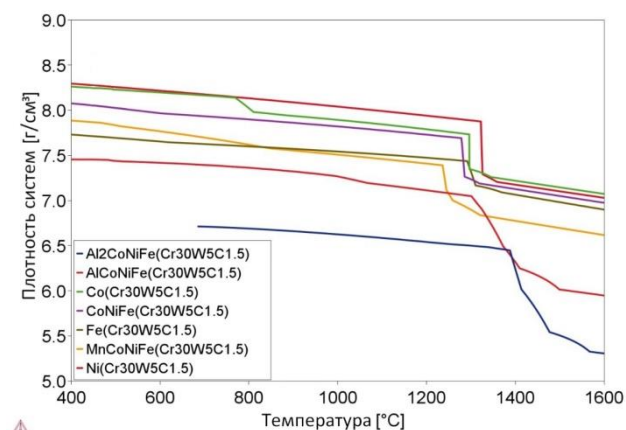


Рис. 2. Результаты моделирования изменения плотности образцов различных изученных составов в интервале температур 400–1600 °C при условии достижения составами образцов состояния фазового равновесия

Fig. 2. Simulation results of density changes for samples of various studied compositions in the temperature range of 400–1600 °C under the condition of achieving phase equilibrium in the samples

Результаты моделирования кристаллизации по методу Шейла (представленные на **рис. 3**, наряду с результатами моделирования с использованием модели равновесной кристаллизации – линии «Равновесие») выявили различия в последовательности фазообразования. В системах  $\text{AlCoNiFe}(\text{Cr30W5C1.5})$  и  $\text{Al}_2\text{CoNiFe}(\text{Cr30W5C1.5})$  кристаллизация начинается с выделения карбидов  $\text{M}_7\text{C}_3$  (**рис. 3, а и б**), тогда в  $\text{CoNiFe}(\text{Cr30W5C1.5})$  и  $\text{Co}(\text{Cr30W5C1.5})$  первичной фазой является ГЦК-матрица (**рис. 3, г и д**). Для  $\text{MnCoNiFe}(\text{Cr30W5C1.5})$  и  $\text{Fe}(\text{Cr30W5C1.5})$  первичное образование  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  сопровождается последующим появлением  $\text{M}_7\text{C}_3$  (**рис. 3, в и ж**). Интервал кристаллизации (величина, влияющая на ликвацию) варьируется от 50 °C (для  $\text{Ni}(\text{Cr30W5C1.5})$ ) до 250 °C (для  $\text{Al}_2\text{CoNiFe}(\text{Cr30W5C1.5})$ ). В системах с алюминием возможно формирование двух ОЦК-фаз, потенциально ведущих к микроструктурной неоднородности.

Полученные данные демонстрируют, что состав матрицы  $\text{M}$  в сплавах  $\text{M}(\text{Cr30W5C1.5})$  критически влияет на фазовую стабильность, микроструктуру и теплофизические свойства. Преобладание ОЦК-структур в алюминийсодержащих системах согласуется с известной способностью алюминия образовывать в многокомпонентных сплавах фазы с объемно-центрированной кубической решеткой. Это может быть связано с его электронными характеристиками, которые изменяют межатомные взаимодействия и подавляют формирование ГЦК-фаз. Однако наличие двух ОЦК-фаз в  $\text{Al}_2\text{CoNiFe}(\text{Cr30W5C1.5})$  указывает на возможную химическую неоднородность матрицы, что требует дополнительного изучения для оценки её влияния на пластичность и прочность.

Различия в доминирующих карбидных фазах ( $\text{M}_7\text{C}_3$  или  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ ) между системами подчеркивают роль основного металла матрицы в термодинамической стабильности образующихся соединений. Например, пре-

обладание  $\text{M}_7\text{C}_3$  в системе на основе кобальта (Stellite 6) коррелирует с промышленными данными, согласно которым этот карбид обеспечивает высокую износостойкость. В то же время сосуществование  $\text{M}_7\text{C}_3$  и  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  в  $\text{MnCoNiFe}(\text{Cr30W5C1.5})$  и  $\text{CoNiFe}(\text{Cr30W5C1.5})$  может создавать сложные микроструктуры с градиентами твердости, что создаёт возможность управления распределением частиц карбидов посредством вариации термических режимов.

Результаты моделирования плотности выявили ключевые риски для алюминийсодержащих систем: значительное снижение плотности при кристаллизации ( $\Delta\rho$ ) и низкие абсолютные значения указывают на повышенную вероятность усадки и деформаций. Это согласуется с известными проблемами литья легких сплавов, где быстрое охлаждение усиливает внутренние напряжения. Напротив, системы на основе только  $\text{Co}$ ,  $\text{Ni}$  и  $\text{Fe}$  демонстрируют более плавные изменения плотности, что делает их предпочтительными для процессов наплавки с жесткими требованиями к геометрической стабильности.

Анализ кристаллизации с помощью модели Шейла позволяет предположить, что последовательность фазообразования определяет морфологию частиц карбидов. Системы с первичным выделением карбидов (это системы, содержащие алюминий), вероятно, будут склонны к формированию крупных включений, которые могут выступать концентраторами напряжений. В то же время сплавы с первичным образованием металлической матрицы обеспечивают дисперсное распределение карбидов, что должно положительно сказываться на механических свойствах. Широкий интервал кристаллизации в алюминийсодержащих системах (до 250 °C) дополнительно усложняет контроль микроструктуры, повышая роль скорости охлаждения в минимизации ликвации.

Сопоставление расчетов с использованием равновесной и неравновесной моделей подчеркивает ограничения возможностей классических термодинамических подходов. Например, наличие сигма-фазы в равновесных прогнозах для  $\text{Co}(\text{Cr30W5C1.5})$  не противоречит его промышленному применению (Stellite 6), поскольку кинетические барьеры подавляют её образование. Всё это подтверждает необходимость для реалистичного прогнозирования комбинирования CALPHAD с кинетическими моделями. Полученные в ходе работы результаты формируют основу для целевого экспериментального тестирования, направленного на валидацию прогнозов для систем с матрицей, образующейся на основе  $\text{MnCoNiFe}$  и  $\text{CoNiFe}$ , для которых полученные данные по моделированию фазового состава и плотности выглядят наиболее перспективно с точки зрения инженерных применений.

### Заключение

Исследование выявило ключевые закономерности в сплавах вида  $\text{M}(\text{Cr30W5C1.5})$ . Состав матрицы  $\text{M}$  определяет кристаллическую структуру: алюминий стабилизирует ОЦК-решетку, а  $\text{Co}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Fe}$  – ГЦК-фазу. Тип карбидов зависит от состава  $\text{M}$ : в системе на основе  $\text{Co}$  доминирует  $\text{M}_7\text{C}_3$ , в алюмосодержащих системах, а также в  $\text{Fe}$ -,  $\text{Ni}$ -матрицах –  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ .



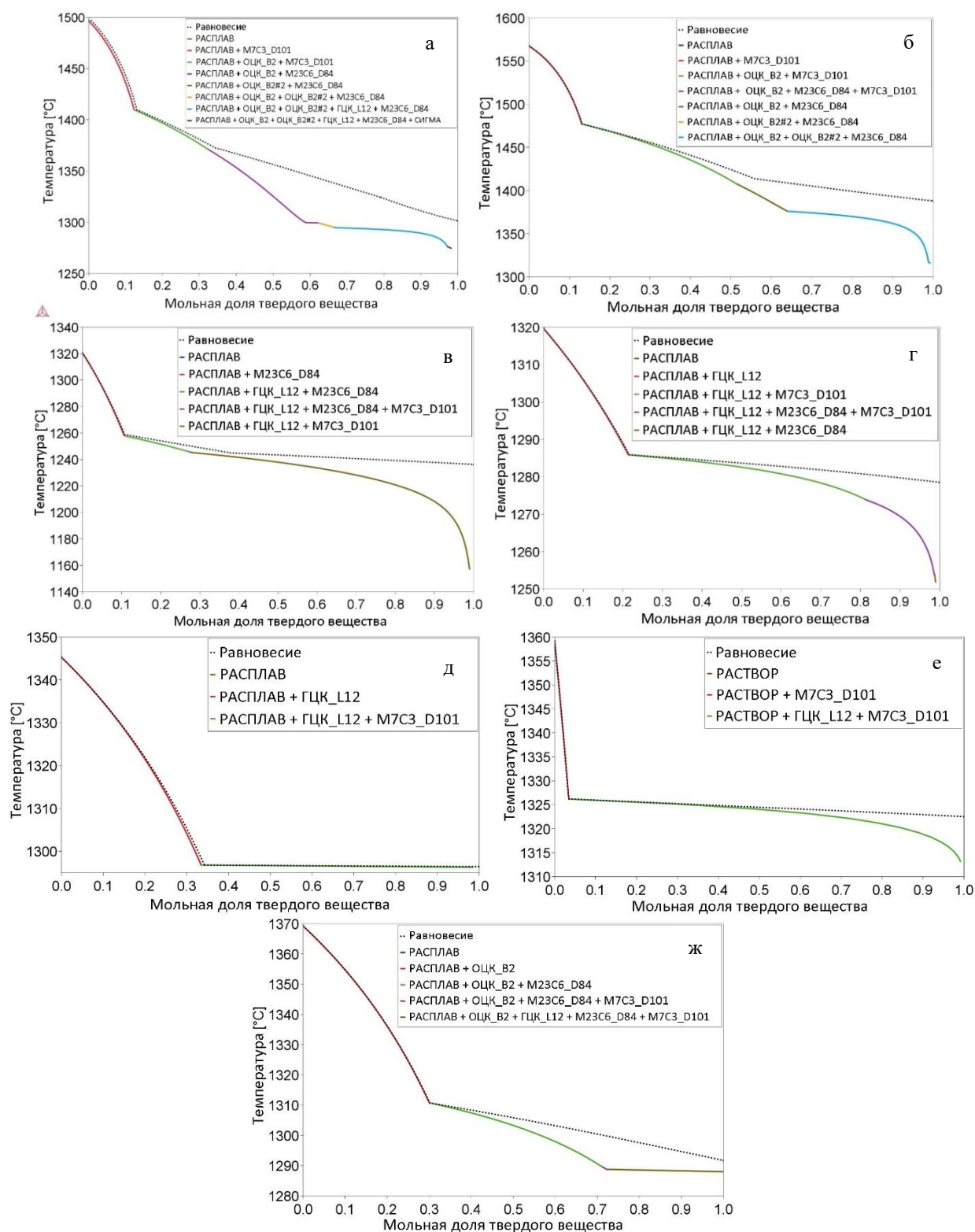


Рис. 3. Результаты моделирования кристаллизации по модели Шейла для систем M(Cr30W5C1.5): а – AlCoNiFe(Cr30W5C1.5); б – Al<sub>2</sub>CoNiFe(Cr30W5C1.5); в – MnCoNiFe(Cr30W5C1.5); г – CoNiFe(Cr30W5C1.5); д – Co(Cr30W5C1.5)/Stellite 6; е – Ni(Cr30W5C1.5); ж – Fe(Cr30W5C1.5)

Fig. 3. Simulation results of crystallization using the Scheil model for the M(Cr30W5C1.5) systems: а is AlCoNiFe(Cr30W5C1.5); б is Al<sub>2</sub>CoNiFe(Cr30W5C1.5); в is MnCoNiFe(Cr30W5C1.5); г is CoNiFe(Cr30W5C1.5); д is Co(Cr30W5C1.5)/Stellite 6; е is Ni(Cr30W5C1.5); ж is Fe(Cr30W5C1.5)



В системах MnCoNiFe(Cr30W5C1.5) и CoNiFe(Cr30W5C1.5) прогнозируется сосуществование разных карбидов. Алюминийсодержащие сплавы демонстрируют на 20–25% меньшую плотность и высокий риск возникновения дефектов при кристаллизации, тогда как системы без алюминия более стабильны.

Анализ результатов моделирования по Шейлу показал, что первичное выделение карбидов (характерное для алюминийсодержащих систем) может привести к образованию крупных включений, ухудшающих свойства металла, а первичное образование металлической матрицы способствует дисперсному распределению упрочняющих фаз. Для прикладного применения, вероятно, наиболее перспективными можно считать сплавы MnCoNiFe(Cr30W5C1.5) и CoNiFe(Cr30W5C1.5), сочетающие стабильную ГЦК-матрицу и возможность управления карбидообразованием. Комбинация методов CALPHAD и модели Шейла подтвердила свою эффективность для оптимизации многокомпонентных сплавов.

#### Список источников

1. Deloro Stellite Group. URL: <https://www.deloro.com> (дата обращения: 12.10.2023).
2. Dwivedi, Dheerendra Kumar. Surface engineering: Enhancing life of tribological components // Springer India. 2018. 224 p. DOI: 10.1007/978-81-322-3779-2
3. Femtosecond laser joining of Stellite and stainless steel / David Fieser, Lingyue Zhang, Matthew Yao, Hugh Shortt, Peter Liaw, Anming Hu // Manufacturing Letters Volume 41, Supplement, October 2024, Pages 332-338. DOI: 10.1016/J.MFGLET.2024.09.039
4. Некрасов Р.Ю., Темпель О.А., Васков Д.Е. Восстановление работоспособности крупногабаритных деталей с применением наплавки стеллитом // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 11. С. 431–435.
5. ГОСТ 21449-75. Прутки для наплавки. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1975. 32 с.
6. Воздвиженский В.М., Грачев В.А., Спасский В.В. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении. Москва: Машиностроение, 1984. 432 с.
7. High-entropy alloys / Murty B.S., Ranganathan S., Yeh J.W., Bhattacharjee P.P. // Elsevier Inc. 2019. 363 p.
8. Cantor, Brian. Fundamentals of Multicomponent High-Entropy Materials // Oxford University Press. 2024. 534 p. DOI: 10.1093/9780191986710.001.0001
9. High-entropy alloys: Fundamentals and applications / Michael C. Gao, Jien-Wei Yeh, Peter K. Liaw, Yong Zhang // Springer International Publishing, 2016. 516 p.
10. Yanchun Zhou, Huimin Xiang, Fu-zhi Dai. High-Entropy Materials: From Basics to Applications // Wiley-VCH GmbH, 2023. 261 p. DOI: 10.1002/9783527837205
11. Development of a new high entropy alloy for wear resistance: FeCoCrNiW0.3 and FeCoCrNiW0.3 + 5 at.% of C // Materials & Design. 2017, vol. 115, pp. 247-254.
12. Miracle D.B., Senkov O.N. Acta Materialia A critical review of high entropy alloys and related concepts // Acta Mater. 2017, vol. 122, pp. 448-511.
13. Thermodynamic modelling of a six component (C-Co-Cr-Ni-Ta-W) system for the simulation of Cobalt based alloys // Journal of Alloys and Compounds. 2018, vol. 730, pp. 291-310.
14. Microstructure and Performance Characterization of a Novel Cobalt High-Entropy Alloy / Xueyao Wu, Rong Liu, Xiaozhou Zhang, and Matthew X. Yao // Metallurgical And Materials Transactions A 4066 – Volume 52A, 2021. doi: 10.1007/s11661-021-06365-8
15. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys / B. Cantor, I.T.H. Chang, P. Knight, A.J.B. Vincent // Materials Science and Engineering: A, 2004, 375-377(1-2 SPEC. ISS.), p. 213-218.
16. Thermodynamic database for multi-principal element alloys within the system Al-Co-Cr-Fe-Mn-Ni-C / Bengt Hallstedt, Mehdi Noori, Fabian Kies, Felix Oppermann, Christian Haase // Calphad. Volume 83, December 2023, 102644. DOI: 10.1016/J.CALPHAD.2023.102644
17. Strengthening mechanism in two-phase FeCoCrNiMnAl high entropy alloy coating / Yan Cui, Junqi Shen, Sunusi Marwana Manladan, Keping Geng, Shengsun Hu // Applied Surface Science Volume 530, 15 November 2020, 147205. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.147205
18. Multiscale-phase-driven strength-ductility synergy in Fe3Cr2CoNiAlx high entropy alloys // Shu Xu, Xingshuo Liu, Rui Li, Xiaofeng Fan, Qingqi Liu, Aoxiang Li, Pengfei Yu, Yongyong Wang, Gong Li // Intermetallics Volume 156, May 2023, 107865 DOI: 10.1016/J.INTERMET.2023.107865

#### References

1. Deloro Stellite Group. Available at: <https://www.deloro.com> (Accessed October 12, 2023).
2. Dwivedi Dheerendra Kumar. Surface engineering: Enhancing life of tribological components. Springer India, 2018. 224 p. DOI: 10.1007/978-81-322-3779-2.
3. Fieser David, Zhang Lingyue, Yao Matthew, Shortt Hugh, Liaw Peter, Hu Anming. Femtosecond laser joining of Stellite and stainless steel. Manufacturing Letters. 41, 332-338 (2024). DOI: 10.1016/j.mfglet.2024.09.039.
4. Nekrasov R.Yu., Tempel O.A., Vaskov D.E. Restoration of large-sized parts operability using Stellite cladding. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya Tula State University. Technical Sciences], 2021;(11):431-435. (In Russ.)
5. State standard GOST 21449-75. Rods for Cladding. Technical Specifications. Moscow: Standards Publishing House, 1975, 32 p. (In Russ.)
6. Vozdvizhensky V.M., Grachev V.A., Spassky V.V. *Liteynye splavy i tekhnologiya ikh plavki v mashinostroenii*. [Foundry alloys and their melting technology in mechanical engineering]. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 432 p. (In Russ.)
7. Murty B.S., Ranganathan S., Yeh J.W., Bhattacharjee P.P. High-entropy alloys. Elsevier Inc., 2019, 363 p.
8. Cantor Brian. Fundamentals of Multicomponent High-Entropy Materials. Oxford University Press, 2024, 534 p. DOI: 10.1093/9780191986710.001.0001.
9. Gao Michael C., Yeh Jien-Wei, Liaw Peter K., Zhang Yong. High-entropy alloys: Fundamentals and applications. Springer International Publishing, 2016, 516 p.
10. Zhou Yanchun, Xiang Huimin, Dai Fuzhi. High-Entropy Materials: From Basics to Applications. Wiley-VCH GmbH, 2023, 261 p. DOI: 10.1002/9783527837205
11. Development of a New High Entropy Alloy for Wear Resistance: FeCoCrNiW0.3 and FeCoCrNiW0.3 + 5 at.% of C. Materials & Design. 2017;115:247-254.

12. Miracle D.B., Senkov O.N. A Critical Review of High Entropy Alloys and Related Concepts. *Acta Materialia*. 2017;122:448-511.
13. Thermodynamic Modelling of a Six-Component (C-Co-Cr-Ni-Ta-W) System for the Simulation of Cobalt-Based Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;730:291-310.
14. Wu Xueyao, Liu Rong, Zhang Xiaozhou, Yao Matthew X. Microstructure and Performance Characterization of a Novel Cobalt High-Entropy Alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 52A (2021). DOI: 10.1007/s11661-021-06365-8
15. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural Development in Equiatomic Multicomponent Alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2004;375-377(1-2):213-218.
16. Hallstedt Bengt, Noori Mehdi, Kies Fabian, Oppermann Felix, Haase Christian. Thermodynamic Database for Multi-Principal Element Alloys within the System Al-Co-Cr-Fe-Mn-Ni-C. *Calphad*. 2023;83:102644. DOI: 10.1016/J.CALPHAD.2023.102644
17. Cui Yan, Shen Junqi, Manladan Sunusi Marwana, Geng Keping, Hu Shengsun. Strengthening Mechanism in Two-Phase FeCoCrNiMnAl High Entropy Alloy Coating. *Applied Surface Science*. 2020;530:147205. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.147205
18. Xu Shu, Liu Xingshuo, Li Rui, Fan Xiaofeng, Liu Qingqi, Li Aoxiang, Yu Pengfei, Wang Yongyong, Li Gong. Multiscale-Phase-Driven Strength-Ductility Synergy in Fe<sub>3</sub>Cr<sub>2</sub>CoNiAl<sub>x</sub> High Entropy Alloys. *Intermetallics*. 2023;156:107865. DOI: 10.1016/J.INTERMET.2023.107865

Поступила 11.04.2025; принята к публикации 14.05.2025; опубликована 30.06.2025  
Submitted 11/04/2025; revised 14/05/2025; published 30/06/2025

**Бодров Евгений Геннадьевич** – технический директор,  
АО «КОНАР», Челябинск, Россия.

Email: e\_bodrov@mail.ru. ORCID 0009-0007-4896-8394

**Шабалина Дарья Александровна** – лаборант,

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет),  
Челябинск, Россия.

Email: darasabalina359@gmail.com. ORCID 0009-0009-3881-2542

**Самодурова Марина Николаевна** – доктор технических наук, и.о. заведующего кафедрой,

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет),  
Челябинск, Россия.

Email: samodurovamn@susu.ru. ORCID 0000-0002-1505-1068

**Киселев Михаил Викторович** – студент,

Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.

Email: geos86@gmail.com. ORCID 0009-0002-5744-1512

**Зайцева Ольга Владимировна** – кандидат химических наук, доцент,

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет),  
Челябинск, Россия.

Email: zaitcevaov@susu.ru. ORCID 0000-0001-5888-3297

**Трофимов Евгений Алексеевич** – доктор химических наук, профессор,

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет),  
Челябинск, Россия.

Email: trofimovea@susu.ru. ORCID 0000-0001-8073-3244

**Evgenii G. Bodrov** – Technical Director,

JSC KONAR, Chelyabinsk, Russia.

Email: e\_bodrov@mail.ru. ORCID 0009-0007-4896-8394

**Darya A. Shabalina** – Laboratory Assistant,

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.

Email: darasabalina359@gmail.com. ORCID 0009-0009-3881-2542

**Marina N. Samodurova** – DrSc(Eng.), Acting Head of the Department,

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.

Email: samodurovamn@susu.ru. ORCID 0000-0002-1505-1068

**Mikhail V. Kiselev** – Student,

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.

Email: reos86@gmail.com. ORCID 0009-0002-5744-1512

**Olga V. Zaitseva** – PhD (Eng.), Associate Professor,

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.

Email: zaitcevaov@susu.ru. ORCID 0000-0001-5888-3297

**Evgeny A. Trofimov** – DrSc(Eng.), Professor,

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.

Email: trofimovea@susu.ru. ORCID 0000-0001-8073-3244

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 669:715  
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-119-127



## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА ГОМОГЕНИЗАЦИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МИКРОСТРУКТУРУ ЛИСТА ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО ВЫСОКОМАГНИЕВОГО СПЛАВА С ДОБАВКАМИ СКАНДИЯ, ЦИРКОНИЯ, ГАФНИЯ И ЭРБИЯ

Арышенский Е.В.<sup>1</sup>, Рагазин А.А.<sup>2</sup>, Распосиенко Д.Ю.<sup>3</sup>, Коновалов С.В.<sup>1</sup>, Арышенский В.Ю.<sup>2</sup>, Лапшов М.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

<sup>2</sup>Самарский университет, Самара, Россия

<sup>3</sup>Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

**Аннотация.** Проведено исследование влияния режимов гомогенизации на микроструктуру и механические свойства ленты из высокомагниевого алюминиевого сплава 1590-4, экономнолегированного скандием с содержанием циркония, гафния и эрбия. Для этого исследуемый сплав был гомогенизирован по одноступенчатому и двухступенчатому режиму. После гомогенизации обоими способами осуществлялась горячая и холодная прокатка с последующим отжигом. После завершения отжига у образцов исследовались тонкая микроструктура и механические свойства. Структуру и фазовый анализ исследовали методом просвечивающей электронной микроскопии. Методом одноосного растяжения исследовались механические свойства, а именно временное сопротивление разрыву и условный предел текучести. С помощью просвечивающей микроскопии исследовалась морфология и химический состав наночастиц. Кроме того, для литого состояния проводилась сканирующая микроскопия для исследования морфологии и химического состава крупных интерметаллидных частиц. Выявлено, что образцы после двухступенчатой гомогенизации обладают лучшими механическими свойствами, чем образцы после одноступенчатой гомогенизации, за счет более обильного выпадения мелкодисперсных частиц  $Al_3(ScZrHf)$ . В свою очередь, большее количество частиц, формирующихся после двухступенчатой гомогенизации, способствует более интенсивному взаимодействию с ними дислокаций, вызывая тем самым дополнительное упрочнение. С другой стороны, большее количество частиц  $Al_3(ScZrHf)$  на этапе заключительного отжига способствует торможению дислокаций и замедляет процессы полигонизации и рекристаллизации, что также ведет к росту прочностных свойств. Эрбий был обнаружен только в виде крупных интерметаллидных частиц, что, по всей видимости, объясняется его очень низкой растворимостью в алюминиевой матрице, поэтому он не участвует в образовании данных наночастиц.

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, микролегирование, скандий, гафний, эрбий, горячая и холодная прокатка, механические свойства, микроструктура, просвечивающая микроскопия, наночастицы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00810, <https://rscf.ru/project/22-19-00810/>

© Арышенский Е.В., Рагазин А.А., Распосиенко Д.Ю., Коновалов С.В., Арышенский В.Ю., Лапшов М.А., 2025

### Для цитирования

Исследование влияния режима гомогенизации на механические свойства и микроструктуру листа из алюминиевого высокомагниевого сплава с добавками скандия, циркония, гафния и эрбия / Арышенский Е.В., Рагазин А.А., Распосиенко Д.Ю., Коновалов С.В., Арышенский В.Ю., Лапшов М.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 119-127. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-119-127>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# STUDY OF THE INFLUENCE OF THE HOMOGENIZATION TREATMENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF A SHEET OF HIGH-MAGNESIUM ALUMINUM ALLOY DOPED WITH SCANDIUM, ZIRCONIUM, HAFNIUM AND ERBIUM

Aryshenskiy E.V.<sup>1</sup>, Ragazin A.A.<sup>2</sup>, Rasposienko D.Yu.<sup>3</sup>, Konovalov S.V.<sup>1</sup>, Aryshenskiy V.Yu.<sup>2</sup>, Lapshov M.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

<sup>2</sup> Samara University, Samara, Russia

<sup>3</sup> M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

**Abstract.** The effect of homogenization modes on the microstructure and mechanical properties of a strip of high-magnesium aluminum alloy 1590-4 sparingly alloyed with scandium and containing zirconium, hafnium and erbium was studied. For this purpose, the alloy under study was homogenized using single-stage and two-stage modes. After homogenization by both methods, hot and cold rolling followed by annealing were carried out. After completion of annealing, the fine microstructure and mechanical properties of the samples were studied. The structure and phase analysis were studied using transmission electron microscopy. The mechanical properties, namely, the tensile strength and the yield strength, were studied using the uniaxial tension method. The morphology and chemical composition of nanoparticles were studied using transmission microscopy. In addition, scanning microscopy was used for the cast state to study the morphology and chemical composition of large intermetallic particles. It was found that the samples after two-stage homogenization have better mechanical properties than the samples after single-stage homogenization due to more abundant precipitation of fine  $\text{Al}_3(\text{ScZrHf})$  particles. In turn, a larger number of particles formed after two-stage homogenization contributes to a more intense interaction of dislocations with them, thereby causing additional strengthening. On the other hand, a larger number of  $\text{Al}_3(\text{ScZrHf})$  particles at the final annealing stage contributes to the inhibition of dislocations and slows down the processes of polygonization and recrystallization, which also leads to an increase in strength properties. Erbium was detected only in the form of large intermetallic particles, which is apparently due to its very low solubility in the aluminum matrix, so it does not participate in the formation of these nanoparticles.

**Keywords:** aluminum alloys, microalloying, scandium, hafnium, erbium, hot and cold rolling, mechanical properties, microstructure, transmission microscopy, nanoparticles

The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 22-19-00810, <https://rscf.ru/project/22-19-00810/>

## For citation

Aryshenskiy E.V., Ragazin A.A., Rasposienko D.Yu., Konovalov S.V., Aryshenskiy V.Yu., Lapshov M.A. Study of the Influence of the Homogenization Treatment on the Mechanical Properties and Microstructure of a Sheet of High-Magnesium Aluminum Alloy Doped with Scandium, Zirconium, Hafnium and Erbium. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 119-127. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-119-127>

## Введение

Алюминиевые сплавы являются неотъемлемой частью производства в различных отраслях промышленности. Они применяются в ракетостроении, автомобилестроении, пищевой промышленности и в других областях, где требуется низкий вес полуфабриката с высокими прочностными свойствами и коррозионной стойкостью [1–7].

Использование сплавов системы Al-Mg с малыми добавками переходных металлов является одним из перспективных путей развития современной металлургии. Добавление магния в алюминиевые сплавы вызывает твердорастворное упрочнение, улучшая тем самым механические свойства алюминиевых сплавов [8].

Обоснованность добавления переходных металлов связана с тем, что их низкая подвижность в кристаллической решетке алюминия позволяет получать сплавы с высокими механическими характеристиками [9, 10]. В ходе термической обработки таких сплавов подавляются процессы возврата и рекристаллизации, что способствует повышению их прочностных характеристик [11–13]. Также введение переходных металлов может существенно модифицировать литую структуру [14]. Наибольший эффект достигается при легировании малыми добавками Sc в сочетании с Zr. Также Sc оказывает положительное влияние на прочностные эффекты за счет выпадения из пересыщенного твердого раствора упрочняющей фазы  $\text{Al}_3\text{Sc}$  [14]. Однако стоит упомянуть, что Sc термически неустойчив и при высоких температурах начинает коа-



гулировать, а также существенно повышает стоимость сплава из-за своей дороговизны.

Для замедления процесса коагуляции, а также снижения количества скандия, необходимого для формирования количества наночастиц, достаточного для эффективного упрочнения, в данные сплавы также добавляют цирконий [14]. Повышение термостабильности частиц  $Al_3Sc$  происходит, в частности, благодаря способности циркония образовывать вокруг них термостабилизирующую оболочку. Схожим влиянием на частицы  $Al_3Sc$  обладает и гафний [15]. Он особенно эффективен в сочетании с цирконием [15]. Еще одним переходным элементом, перспективным для использования в алюминиевых сплавах, является эрбий. Частицы  $Al_3Er$  формируются при меньшей температуре, чем частицы  $Al_3Sc$ , и играют роль зародышей для последних, увеличивая их количество [16].

Одним из перспективных высокомагниевого сплава, содержащих одновременно малые добавки скандия, циркония, гафния и эрбия, является недавно разработанный сплав 1590 [17]. В предыдущих исследованиях [18] изучалось влияние одноступенчатой термической обработки на формирование микроструктуры в данном сплаве, однако особый интерес представляет изучение влияния на нее многоступенчатого отжига. Двухступенчатая термическая обработка позволяет, во-первых, получить больше зародышей на первых ступенях, характеризующихся низкой температурой, во-вторых, способствует лучшему формированию оболочки из элементов с низкой диффузией (Zr, Hf) на завершающих этапах с высокой температурой. В связи с этим целью данной научной работы является исследование влияния двухступенчатой термической обработки на механические свойства ленты из алюминиевого сплава системы Al-Mg с легирующими элементами Sc, Zr, Hf и Er.

### Материалы и методы исследования

Для исследования был отлит плоский слиток из сплава 1590-4, химический состав которого представлен в табл. 1. Элементный состав сплавов был определен спектральным методом на атомно-эмиссионном спектрометре ARL 3460.

Таблица 1. Химический состав сплава 1590-4  
Table 1. Chemical composition of alloy 1590-4

Массовая доля элементов, %											
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr	Sc	Er*	Hf*	
0,05	0,08	-	0,41	5,53	-	0,21	0,1	0,14	0,1	0,1	

\*Указанное содержание Er, Hf согласно расчету.

Экспериментальная плавка проводилась в среднечастотной индукционной печи с помощью графитового тигля. Масса полученного расплава составила 4-5 кг, а масса литого слитка – 3 кг. В качестве шихты были использованы следующие материалы: алюминий А85, первичный магний МГ90, цинк

Ц1, лигатуры Al-Sc<sub>2</sub>, Al-Zr<sub>5</sub>, Al-Mn<sub>10</sub>, Al-Er<sub>5</sub>, Al-Hf<sub>2</sub>. Лигатуры вводили в температурном диапазоне 770–790°C, для лучшего усвоения смесь подвергали воздействию в течение 5 мин. Присадка магния и цинка осуществлялась после охлаждения расплава до температуры 740°C. После присадки всех легирующих компонентов удаляли шлак с поверхности расплавленного металла и отбирали пробу для определения химического состава сплава. Перед заливкой расплава в форму металл рафинировали карналлитовым флюсом для очистки расплавов от неметаллических и водородных включений. Флюс вводили из расчета 5 г на 1 кг шихты. После затвердевания слиток извлекали из кокиля и охлаждали в воде.

Далее слитки проходили гомогенизацию при температуре 440°C в течение 4 ч.

Прокатка слитков производилась на реверсивном прокатном стане: в горячую при температуре 500 °C до 6 мм, затем в холодную до 2 мм, суммарный процент обжатия составил 66%. После холодной прокатки производили отжиги листов при различных температурах – от 330 до 550°C с последующими исследованиями микроструктуры и механических свойств.

Для определения механических свойств исследуемых алюминиевых сплавов на универсальной испытательной машине (Zwick / Roell Z050) был осуществлен ряд испытаний на одноосное растяжение в соответствии с ISO 6892-1 при комнатной температуре. Размеры образцов выбирались в соответствии с DIN 50125. Расчеты получаемых в результате испытаний свойств, а именно условный предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ), временное сопротивление разрыву ( $\sigma_b$ ) были проведены в соответствии с ГОСТ 1497-84 и ГОСТ 11150-84.

Исследование структуры и фазовый анализ проведены методом просвечивающей электронной микроскопии с использованием стандартных методик: светопольных, темнопольных изображений и микродифракции электронов. Линейные размеры элементов структуры определялись непосредственными измерениями на плоскости наблюдения.

Для электронно-микроскопических исследований образцы механически утоняли путем двусторонней шлифовки на мелкозернистой шлифовальной бумаге до 40–60 мкм. Далее полученные пластинки электролитически утоняли до толщины, пригодной для просвечивания в электронном микроскопе. После этого образцы вырезали с помощью модуля Ultrasonic Disk Cutter диаметром 3 мм. Электрополировку проводили в установке электролитического утонения Struers Tenipol с использованием стандартного электролита для алюминиевых сплавов А2, рекомендованного фирмой Struers. Для чистки поверхности фольги от углеродных следов и, при необходимости, для заключительного утонения и увеличения обзорных полей применяли прибор ионной полировки PIPS II. Исследование структуры и фазовый анализ проводили методами просвечивающей электронной микроскопии с

использованием стандартных методик светлопольных, темнопольных изображений и микродифракции электронов. Линейные размеры элементов структуры определяли непосредственными измерениями на плоскости наблюдения.

Идентификацию выделившихся при распаде пересыщенного твердого раствора фаз проводили, рассчитывая их межплоскостные расстояния по дополнительным рефлексам на электронограммах и анализируя их химический состав. Рассчитанные межплоскостные расстояния сопоставляли с данными, приведенными в международных рентгенометрических таблицах (JCPDS-ICDD). Для выявления морфологии и характера распределения каждой из выделившихся фаз проводили анализ темнопольных изображений в дополнительных рефлексах этих фаз.

### Полученные результаты и их обсуждение

На **рис. 1** представлены механические свойства сплава 1590-4 после гомогенизации слитка по одноступенчатому режиму  $440^{\circ}\text{C} - 4 \text{ ч}$  и двухступенчатому режиму  $370^{\circ}\text{C} - 8 \text{ ч} + 440^{\circ}\text{C} - 4 \text{ ч}$ , горячей прокатки при температуре  $500^{\circ}\text{C}$  с последующей холодной прокаткой и отжигами от  $370$  до  $550^{\circ}\text{C}$  в течение 30 мин.

Выявлено, что сплав 1590-4 в холоднокатаном состоянии при двухступенчатой термической обработке имеет наибольшие показатели временного сопротивления разрыву – 479 МПа и условного предела текучести – 438 МПа. Таким образом, замена термической обработки с одноступенчатой на двухступенчатую повышает временное сопротивление разрыву на 24 МПа, а условный предел текучести – на 15 МПа.

После проведения отжига холоднокатаной ленты по режиму  $370^{\circ}\text{C} - 30 \text{ мин}$  временное сопротивление разрыву у сплава после двухступенчатой гомогенизации снижается на 16%, а условный предел текучести на 30% по сравнению с нагартованным состоянием. При одноступенчатой термической обработке падение предела прочности составило 24%, а предела текучести – 32%.

После проведения отжига по режиму  $440^{\circ}\text{C} - 30 \text{ мин}$  снижение временного сопротивления разрыву незначительное для двух режимов термической обработки, однако условный предел текучести падает по сравнению с предыдущим отжигом на 15–16%.

После проведения отжига по режиму  $500^{\circ}\text{C} - 30 \text{ мин}$  наблюдается более резкое падение условного предела текучести для обоих режимов термической обработки и составляет 11% по сравнению с предыдущим отжигом, что можно объяснить началом рекристаллизации. При этом стоит отметить, что механические характеристики образца после двухступенчатой термической обработки выше, чем у сплава

после одноступенчатой термической обработки, а именно временное сопротивление разрыву больше на 39 МПа.

Дальнейшие отжиги ленты при температурах  $530$  и  $550^{\circ}\text{C}$  в течение 30 мин показывают одинаковую динамику снижения механических свойств. Стоит отметить, что показатели механических свойств после двухступенчатого режима гомогенизации выше на 19–58 МПа по временному сопротивлению разрыву и на 6–20 МПа по условному пределу текучести. Тем самым подтверждается, что при двухступенчатой термической обработке в сплаве происходит максимальное выпадение частиц типа  $\text{L}_{12} \text{Al}_3 (\text{ScZrHf})$ , которые улучшают механические свойства за счет торможения частицами дислокаций в процессе пластической деформации.

Дополнительно при помощи просвечивающей микроскопии была исследована микроструктура при различных режимах гомогенизации (одноступенчатой и двухступенчатой) после отжига ленты  $440^{\circ}\text{C}$  в течение 30 мин.

Микроструктура сплава представлена вытянутыми зернами длиной от 1,5 мкм и более, в объеме которых наблюдаются субзерна вытянутой формы длиной до 600 нм (**рис. 2, а**) и равноосной формы диаметром до 300 нм, выделения в виде пластин фазы  $\text{Al}_6\text{Mn}$  длиной до 150 нм и дисперсоиды  $\text{Al}_3\text{ScZrHf}$  диаметром от 10 до 25 нм (**рис. 2, б, г**). Частицы  $\text{Al}_3\text{ScZrHf}$  характеризуются высокой объемной долей и плотностью распределения в пространстве, они обнаружены как в объеме субзерен, так и по их границам.

Введение двухступенчатой гомогенизации для сплава 1590-4 способствует увеличению дисперсности наночастиц  $\text{Al}_3\text{ScZrHf}$  (**рис. 3, б, г**) и подавлению процессов рекристаллизации, что приводит к образованию после отжига субзеренной структуры. Субзерна характеризуются преимущественно равноосной формой и диаметрами от 250 до 500 нм (**рис. 3, а**). Сохранение участков с повышенной плотностью дислокаций, окруженных многочисленными изгибными контурами, позволяет сделать предположение о незавершенности процесса рекристаллизации.

Следует отметить, что в обоих случаях наблюдается микроструктура, содержащая субзерна. Это означает, что процессы рекристаллизации были подавлены наночастицами  $\text{Al}_3\text{ScZrHf}$  и произошла лишь полигонизация. В то же время двухступенчатая гомогенизация позволяет получать большее количество частиц  $\text{Al}_3\text{ScZrHf}$ , это может объясняться тем, что температура  $370^{\circ}\text{C}$  более благоприятна для распада пересыщенного твердого раствора и выделения зародышей  $\text{Al}_3\text{ScZrHf}$  в виде частиц  $\text{Al}_3\text{Sc}$ , чем при температуре  $440^{\circ}\text{C}$ .

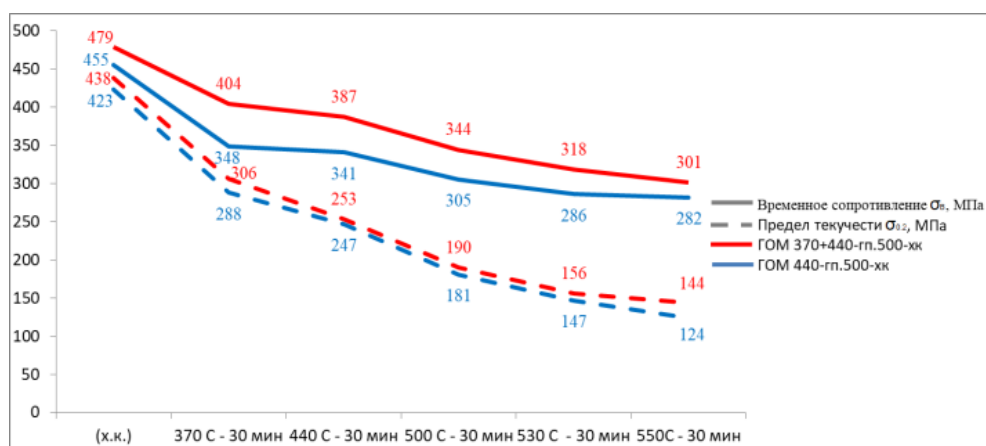


Рис. 1. Механические свойства сплава 1590-4  
Fig. 1. Mechanical properties of alloy 1590-4

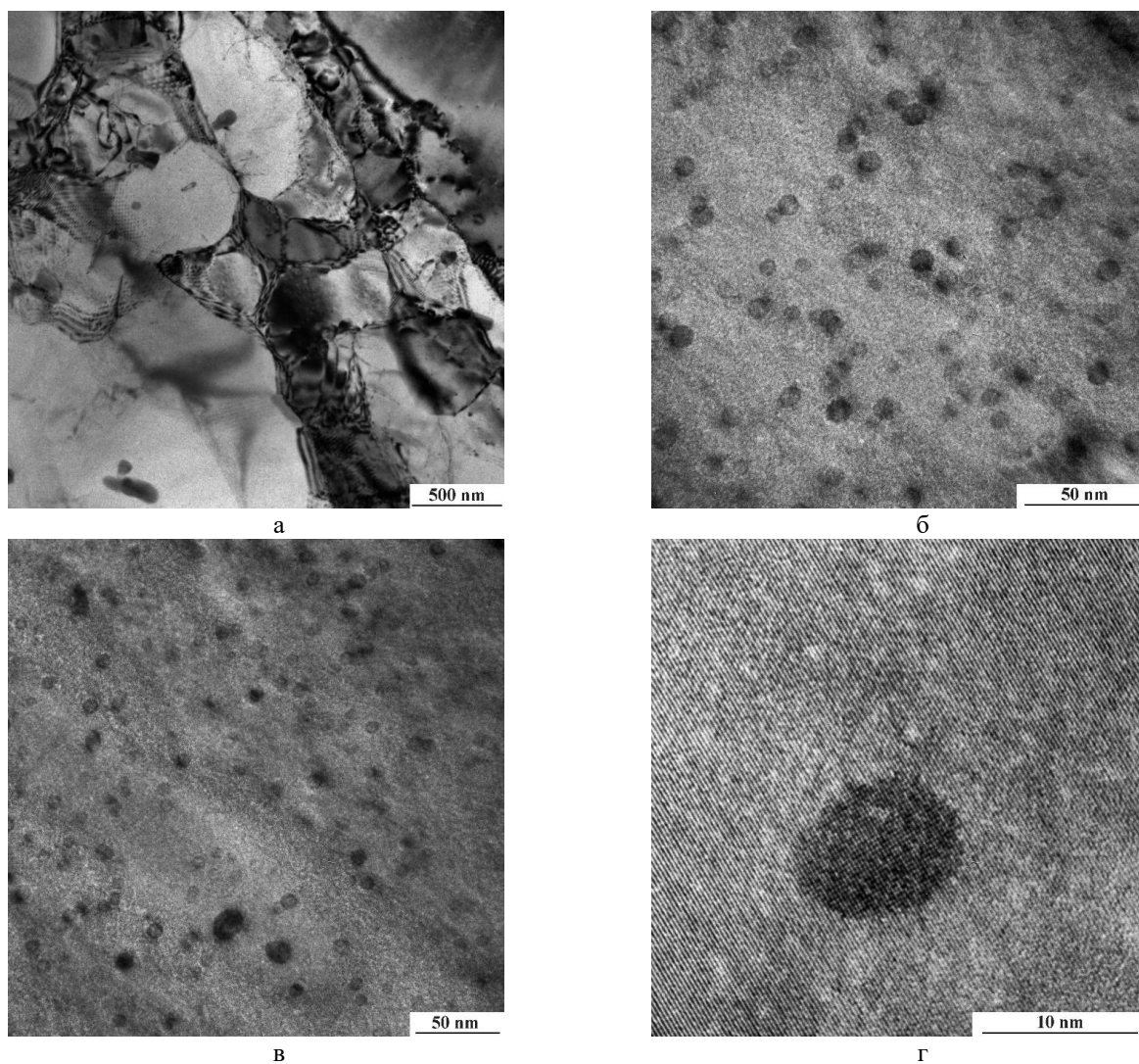


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения микроструктуры холоднокатаного образца 1590-4 после гомогенизации по режиму 440°C – 4 ч, горячей прокатки при температуре 500°C и отжига 440°C – 30 мин

Fig. 2. Electron microscopic images of the microstructure of the cold-rolled sample 1590-4 after homogenization at 440 °C – 4 h, hot rolling at 500 °C and annealing at 440 °C – 30 min



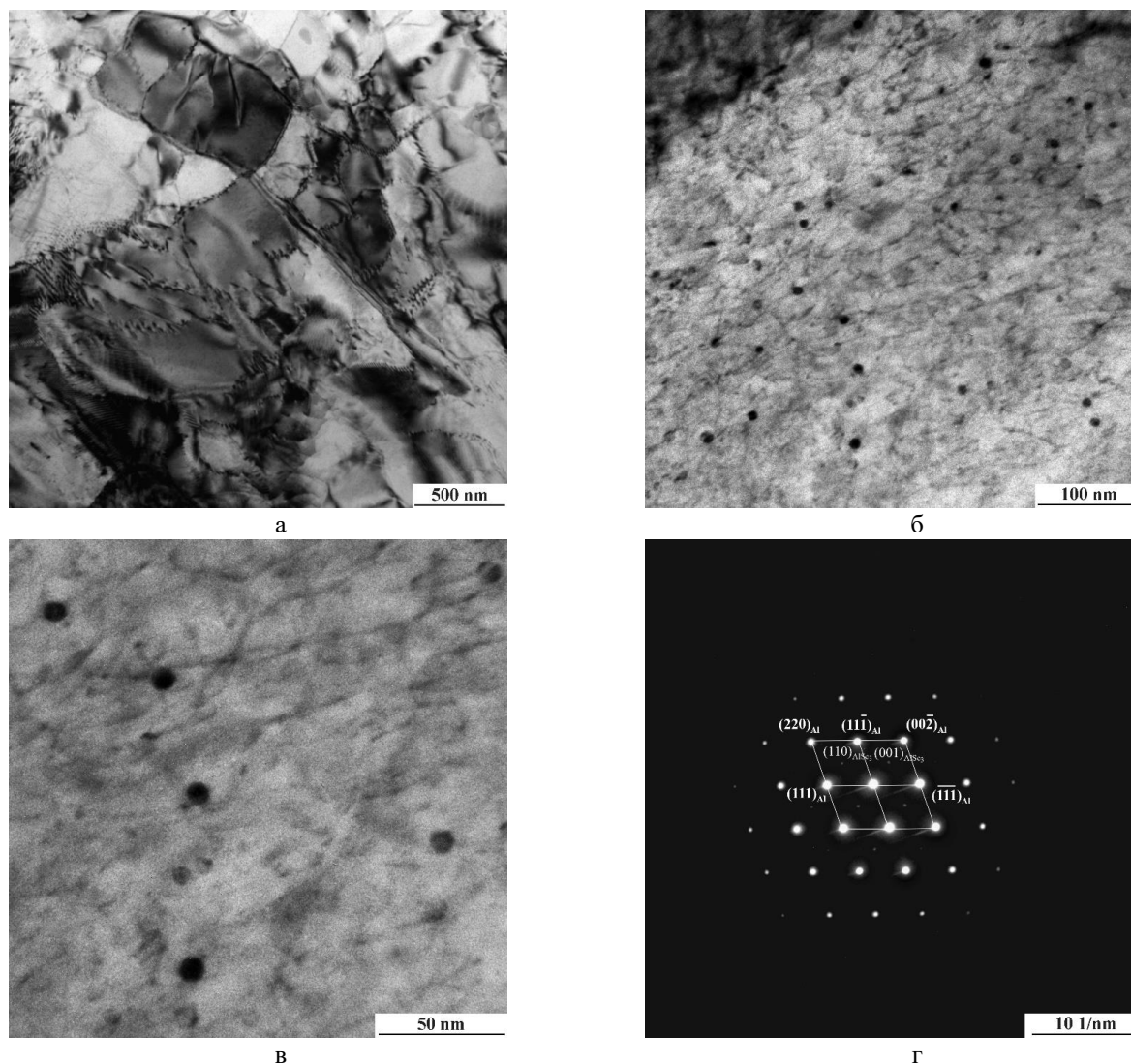


Рис. 3. Электронно-микроскопические изображения микроструктуры холоднокатаного образца 1590-4 после гомогенизации по режиму  $370^{\circ}\text{C} - 8 \text{ ч}$  + по режиму  $440^{\circ}\text{C} - 4 \text{ ч}$ , горячей прокатки при температуре  $500^{\circ}\text{C}$  и отжига  $440^{\circ}\text{C} - 30 \text{ мин}$ : а, б, в – светлопольные изображения; г – микроэлектроннограмма, ось зоны  $[110]_{\text{Al}}$

Fig. 3. Electron microscopic images of the microstructure of the cold-rolled sample 1590-4 after homogenization at  $370^{\circ}\text{C} - 8 \text{ h}$  + at  $440^{\circ}\text{C} - 4 \text{ h}$ , hot rolling at  $500^{\circ}\text{C}$  and annealing at  $440^{\circ}\text{C} - 30 \text{ min}$ : а, б, в are light-field images; г is microelectronogram, zone axis  $[110]_{\text{Al}}$

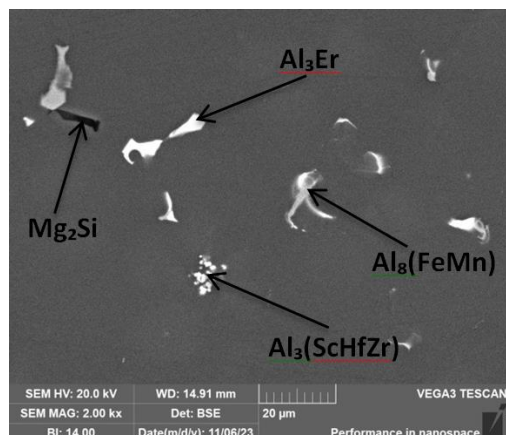
Следует также отметить, что добавки гафния в подобные сплавы в целом термостабилизируют наночастицы и ведут к дополнительному росту прочности [18, 19], что делает их востребованными прежде всего в аэрокосмической промышленности. Кроме того, рост механических свойств на несколько десятков мегапаскалей, вызванный ведением двойного отжига, может показаться незначительным. Однако он является очень хорошим для алюминиевых сплавов, где пределы дальнейшего увеличения свойств во многом исчерпаны. Поэтому увеличение свойств на несколько десятков мегапаскалей является хорошим результатом [20]. Стоит отметить, что промышленный нагрев до температур  $300\text{--}400^{\circ}\text{C}$  массивных алюми-

ниевых слитков может занимать несколько десятков часов, поэтому введение дополнительной ступени, отличающейся от основной температуры лишь на  $60^{\circ}\text{C}$ , не будет приводить к заметному росту стоимости продукции из данного сплава.

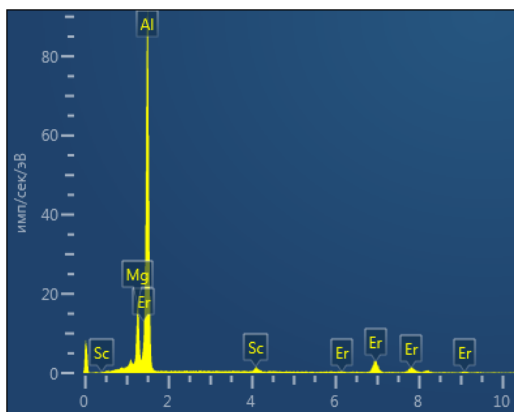
Стоит отметить, что вопрос о содержании Ег в данных частицах остается открытым. В отличие от гафния, он не был выявлен в данных наночастицах ни с помощью атомной томографии, ни с помощью просвечивающей микроскопии [19]. В то же время в данном исследовании эрбий был найден, но лишь в крупных первичных интерметаллидах. Основным объяснением может служить его чрезвычайно низкая растворимость в алюминиевом твердом растворе [20].



Вследствие этого при данной скорости остывания после кристаллизации эрбий не успевает даже частично раствориться в алюминии.



а



Элемент	Вес %
Mg	6.55
Al	66.22
Er	25.99
Sc	1.24
Сумма	100.00

б

Рис. 4. Основные типы интерметаллидов 1590-4 литой (а), спектрограмма  $\text{Al}_3\text{Er}$  (б)

Fig. 4. The main types of intermetallides 1590-4 cast (a),  $\text{Al}_3\text{Er}$  spectrogram (b)

### Закключение

1. Результаты исследования механических свойств холоднокатаной ленты из сплава 1590-4 вне зависимости от температуры отжига показали, что после двухступенчатого режима гомогенизации в режиме  $370^\circ\text{C} - 8 \text{ ч} + 440^\circ\text{C} - 4 \text{ ч}$  временное сопротивление разрыву выше на 19-58 МПа, а условный предел текучести на 6-20 МПа по сравнению с одноступенчатым режимом гомогенизации в режиме  $440^\circ\text{C} - 4 \text{ ч}$ . Тем самым подтверждается, что при двухступенчатой термической обработке в сплаве происходит максимальное выпадение частиц  $\text{Al}_3(\text{ScZrHf})$  типа  $\text{L}_{12}$ , которые повышают механические характери-

ки за счет торможения дислокаций мелкодисперсными частицами в процессе пластической деформации.

2. По результатам исследования микроструктуры при помощи просвечивающей микроскопии выявлено, что при проведении двухступенчатого режима гомогенизации в режиме  $370^\circ\text{C} - 8 \text{ ч} + 440^\circ\text{C} - 4 \text{ ч}$  после прокатки и последующего отжига при температуре  $440^\circ\text{C}$  в течение 30 мин наблюдается более дисперсное распределение наночастиц  $\text{Al}_3\text{ScZrHf}$ , чем при одноступенчатой гомогенизации.

3. Эрбий был выявлен только в крупных первичных интерметаллидах, возникающих при кристаллизации. Причиной этого является его очень низкая растворимость в алюминиевом твердом растворе.

4. Исследуемый сплав является перспективным высокомагниевым сплавом, основной сферой применения которого является аэрокосмическая техника, что объясняется его повышенной прочностью в сочетании с термостабильностью, получаемой за счет добавок гафния.

### Список источников

- Alattar A.L., Bazhin V.Y. Development properties of aluminum matrix composites reinforced by particles of boron carbide // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2021. 1990, no. 1, 012018.
- Alattar A.L., Nikitina L.N., Bazhin V.Y. Increase in the physicomechanical properties of aluminum alloys reinforced with boron carbide particles // Russian Metallurgy (Metallurgy). 2023, no. 6, pp. 688-694.
- Sizyakov V., Bazhin V., Vlasov A. Status and prospects for growth of the aluminum industry // Metallurgist. 2010, no. 54, pp. 409-414.
- Experimental study of the effect of increasing technological plasticity during asymmetric rolling of aluminum alloys / Kozhemyakina A., Pesin A., Pustovoytov D., Nosov L., Baryshnikova A., Lokotunina N., Grachev D. // Superplasticity in Advanced Materials: ICSAM. 2023, no. 32, pp. 309.
- Effect of tool path strategy and tooltip profile on geometrical feature and surface quality of Al-6061 alloy during deformation machining in bending mode / Gupta A.K., Shahare H., Kumar P., Dubey A.K., Pustovoytov D., Yu H., Pesin A., Tandon P. // Advances in Materials and Processing Technologies. 2023, no. 1, pp. 297-314.
- Effect of Ca addition on structure, phase composition and hardness of Al-6%Cu-2%Mn sheet alloy / Belov N., Akopyan T., Tsydenov K., Sviridova T., Cherkasov S., Kovalev A. // Journal of Alloys and Compounds. 2024, no. 1009, 176955.
- Comparative analysis of the effect of magnesium and zinc on the structure and mechanical properties of hot-rolled and cold-rolled alloy Al-2% Cu-1.5% Mn sheets / Tsydenov K. A., Belov N.A., Doroshenko V.V., Shcherbakova O.O., Muravyeva T.I. // Metallurgist. 2024, no. 68, pp. 406-417.
- Strengthening mechanisms in solid solution aluminum alloys / Ryen Ø, Holmedal B., Nijs O., Nes E., Sjölander E., Ekström H.E. // Metallurgical and Materials Transactions A. 2006, no. 6, pp. 1999-2006.
- Elagin V.I. Alloying of deformable aluminum alloys with transition metals [in Russian]. Moscow: Metallurgy, 1975. 247 p.

10. Rana R. S., Purohit R., Das S. Reviews on the influences of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloys and aluminum alloy composites // International Journal of Scientific and research publications. 2012, no. 6, pp. 1-7.
11. Reznik P. L. Influence of processing parameters on the structure and mechanical properties of ingots and semi-finished aluminum alloys of Al-Mg-Mn-Sc-Zr and Al-Cu-Mg-Si systems: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences: 05.16. 01 : dis., 2017. 192 p.
12. Reiso O., Westengen H., Auran L., Ardal og Sunndal Verk a.s, Sunndalsora, Aluminium, 1980, pp. 186–188.
13. Røyset J. Effects of Scandium addition in wrought Aluminium alloys. 2002.
14. Alloying aluminum alloys with scandium and zirconium additives / Davydov V. G., Elagin V. I., Zakharov V. V., Rostoval D. // Metal Science and Heat Treatment. 1996, no. 8, pp. 347-352.
15. The formation of Al<sub>3</sub> (ScxZryHf1– x– y)-dispersoids in aluminium alloys / Hallem H., Lefebvre W., Forbord B., Danoix F., Marthinsen K. // Materials Science and Engineering: A. 2006, no. 1-2, pp. 154-160.
16. Karnesky R. A., Dunand D. C., Seidman D. N. Evolution of nanoscale precipitates in Al microalloyed with Sc and Er // Acta Materialia. 2009, no. 14, pp. 4022-4031.
17. Свариваемый термически не упрочняемый сплав на основе системы Al-Mg: патент на изобретение RU 2726520 C1, 14.07.2020 / Дриц А.М., Арышенский В.Ю., Арышенский Е.В., Захаров В.В. Заявка № 2019127818 от 03.09.2019.
18. Влияние режимов термической обработки на механические свойства алюминиевых сплавов 1570, 1580 и 1590 / Арышенский Е.В., Арышенский В.Ю., Дриц А.М., Гречников Ф.В., Рагазин А.А. // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. № 4. С. 76-87.
19. Грант Российского научного фонда № 22-19-00810. <https://rscf.ru/project/22-19-00810/>
20. Структура, фазовый состав и свойства литатуры Al3Er, полученной гидридной технологией и механической обработкой / Соколов С.Д., Каракчиева Н.И., Абзаев Ю.А., Кахидзе Н.И., Жуков И.А., Сачков В.И., Ворожцов А.Б. // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2024. № 34. С. 29–43.
5. Gupta A. K., Shahare H., Kumar P., Dubey A.K., Pustovoytov D., Yu H., Pesin A., Tandon P. Effect of tool path strategy and tooltip profile on geometrical feature and surface quality of Al-6061 alloy during deformation machining in bending mode. Advances in Materials and Processing Technologies. 2023;(1):297-314.
6. Belov N., Akopyan, T., Tsydenov, K., Sviridova T., Cherkasov, S., Kovalev, A. Effect of Ca addition on structure, phase composition and hardness of Al-6 %Cu-2 %Mn sheet alloy. Journal of Alloys and Compounds. 2024;(1009):176955.
7. Tsydenov K.A., Belov N.A., Doroshenko V.V., Shcherbakova O.O., Muravyeva T.I. Comparative analysis of the effect of magnesium and zinc on the structure and mechanical properties of hot-rolled and cold-rolled alloy Al-2% Cu-1.5% Mn sheets. Metallurgist. 2024;(68):406-417.
8. Ryen Ø, Holmedal B., Nijs O., Nes E., Sjölander E., Ekström H.E. Strengthening mechanisms in solid solution aluminum alloys. Metallurgical and Materials Transactions A. 2006;(6):1999-2006.
9. Elagin V.I. Alloying of deformable aluminum alloys with transition metals [in Russian]. Moscow: Metallurgy, 1975, 247 p.
10. Rana R.S., Purohit R., Das S. Reviews on the influences of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloys and aluminum alloy composites. International Journal of Scientific and research publications. 2012;(6):1-7.
11. Reznik P.L. Influence of processing parameters on the structure and mechanical properties of ingots and semi-finished aluminum alloys of Al-Mg-Mn-Sc-Zr and Al-Cu-Mg-Si systems: Ph.D. dissertation. 2017. 192 p.
12. Reiso O., Westengen H., Auran L., Ardal og Sunndal Verk a.s, Sunndalsora, Aluminium. 1980:186-188.
13. Røyset J. Effects of Scandium addition in wrought Aluminium alloys. 2002.
14. Davydov V. G., Elagin V. I., Zakharov V. V., Rostoval D. Alloying aluminum alloys with scandium and zirconium additives. Metal Science and Heat Treatment. 1996;(8):347-352.
15. Hallem H., Lefebvre W., Forbord B., Danoix F., Marthinsen K. The formation of Al<sub>3</sub> (ScxZryHf1– x– y)-dispersoids in aluminium alloys. Materials Science and Engineering: A. 1-2006;(2):154-160.
16. Karnesky R. A., Dunand D. C., Seidman D. N. Evolution of nanoscale precipitates in Al microalloyed with Sc and Er. Acta Materialia. 2009;(14):4022-4031.
17. Drita A.M., Aryshensky V.Yu., Aryshensky E.V., Zakharov V.V. Svarivaemiy termicheski ne uprochnyaemiy splav na osnove sistemy Al-Mg [A thermally non-hardenable welded alloy based on the Al-Mg system]. Patent RU, no. 2726520 C1, 2020.
18. Aryshensky E.V., Aryshensky V.Yu., Drita A.M., Grechnikov F. V., Ragozin A.A. Influence of heat treatment modes on mechanical properties of aluminum alloys 1570, 1580 and 1590. Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie [Bulletin of Samara University. Aerospace engineering, technology and mechanical engineering], 2022;(4):76-87. (In Russ.)
19. Grant from the Russian Science Foundation № 22-19-00810. Available at: <https://rscf.ru/project/22-19-00810/>

## References

1. Alattar A.L., Bazhin V.Y. Development properties of aluminum matrix composites reinforced by particles of boron carbide. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2021;1990(1):012018.
2. Alattar A.L., Nikitina L.N., Bazhin V.Y. Increase in the physicomechanical properties of aluminum alloys reinforced with boron carbide particles. Russian Metallurgy (Metally). 2023;(6): 688-694.
3. Sizyakov V., Bazhin V., Vlasov A. Status and prospects for growth of the aluminum industry. Metallurgist. 2010;(54):409-414.
4. Kozhemyakina A., Pesin A., Pustovoytov D., Nosov L., Baryshnikova A., Lokotunina N., Grachev D. Experimental study of the effect of increasing technological plasticity during asymmetric rolling of aluminum alloys. Superplasticity in Advanced Materials: ICSAM. 2023;(32):309.

20. Sokolov S.D., Karakchieva N.I., Abzaev Yu.A., Kakhidze N.I., Zhukov I.A., Sachkov V.I., Vorozhtsov A.B. Structure, phase composition and properties of Al3Er ligature obtained by hydride technology and machining. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Himiya* [Tomsk State University Journal of Chemistry], 2024;(34):29-43 (In Russ.)

Поступила 10.11.2024; принята к публикации 09.12.2024; опубликована 30.06.2025  
Submitted 10/11/2024; revised 09/12/2024; published 30/06/2025

**Арышенский Евгений Владимирович** – доктор технических наук, доцент,  
Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.  
Email: arishenskiy\_ev@sibsiu.ru. ORCID 0000-0003-3875-7749

**Рагазин Александр Алексеевич** – аспирант,  
Самарский университет, Самара, Россия.  
Email: sanekragazin63@mail.ru. ORCID 0000-0002-6762-7436

**Распоиенко Дмитрий Юрьевич** – кандидат технических наук,  
Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,  
Екатеринбург, Россия.  
Email: dmitrijrasp@gmail.com. ORCID 0000-0002-7670-9054

**Коновалов Сергей Валерьевич** – доктор технических наук, профессор,  
Сибирский государственный индустриальный университет, Россия.  
Email: konovalov@sibsiu.ru. ORCID 0000-0003-4809-8660

**Арышенский Владимир Юрьевич** – доктор технических наук, профессор,  
Самарский университет, Самара, Россия.  
Email: arysh54@mail.ru. ORCID 0000-0001-6869-4764

**Лапшов Максим Александрович** – аспирант,  
Самарский университет, Самара, Россия.  
Email: lapshov.m.syz@gmail.com. ORCID 0000-0002-1306-4578

**Evgenii V. Aryshenskiy** – DrSc (Eng.), Associate Professor,  
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.  
Email: arishenskiy\_ev@sibsiu.ru. ORCID 0000-0003-3875-7749

**Alexander A. Ragazin** – Postgraduate Student  
Samara University, Samara, Russia.  
Email: sanekragazin63@mail.ru. ORCID 0000-0002-6762-7436

**Dmitry Yu. Rasposienko** – PhD (Eng.),  
M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Ekaterinburg, Russia.  
Email: dmitrijrasp@gmail.com. ORCID 0000-0002-7670-9054

**Sergey V. Konovalov** – DrSc (Eng.), Professor,  
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.  
Email: konovalov@sibsiu.ru. ORCID 0000-0003-4809-8660

**Vladimir Yu. Aryshenskiy** – DrSc (Eng.), Professor,  
Samara University, Samara, Russia.  
Email: arysh54@mail.ru. ORCID 0000-0001-6869-4764

**Maxim A. Lapshov** – Postgraduate Student  
Samara University, Samara, Russia.  
Email: lapshov.m.syz@gmail.com. ORCID 0000-0002-1306-4578

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 621.9.04  
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-128-133



## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВТУЛОК ЦИЛИНДРОВ БУРОВЫХ НАСОСОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕРОГО ЧУГУНА С УПРОЧНЕННЫМ СЛОЕМ

Некрасов Р.Ю., Овсянников В.Е., Губенко А.С.

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** Буровые насосы широко используются предприятиями топливно-энергетического комплекса в ходе работ по освоению новых месторождений. Конструктивно буровой насос представляет собой комплекс оборудования. При этом качество функционирования всей установки в целом зависит от отдельных ее элементов. Одним из «слабых мест» в данном случае являются цилиндрические узлы. Проведенный авторами анализ рисков показал, что это наиболее уязвимая часть оборудования. Главной причиной выхода из строя данного узла является нарушение эксплуатационных характеристик цилиндрической втулки. При этом втулки цилиндров буровых насосов чаще всего изготавливают из двух компонентов: в обойму из стали запрессовывают втулку из чугуна. После сборки требуется финишная механическая обработка. При этом использование закаленного износостойкого чугуна снижает эффективность обработки резанием. В данной работе рассматривается возможность замены втулки из высокопрочного чугуна на втулку из серого чугуна, который подвергнут поверхностному упрочнению. **Цель работы.** Повышение качества цилиндрических узлов буровых насосов на основе использования втулок из серого чугуна с упрочненным слоем. **Используемые методы.** В работе использованы методы планирования эксперимента, расчетов на прочность, квалитетическая оценка, метод конечных элементов, теория резания. **Новизна.** Изготовление износостойких элементов выполняется с использованием нового метода термодиффузионного упрочнения нагревом в контакте с оксидами легирующих элементов. Это позволяет получить на поверхности серого чугуна слой с обратным распределением твердости. В работе проведено комплексное исследование, которое обуславливает возможность замены износостойкого чугуна на серый с упрочненным слоем. **Результат.** Проведены исследования влияния поверхностного упрочнения серого чугуна посредством нагрева в контакте со смесью оксидов легирующих элементов на прочность и жесткость цилиндрических втулок буровых насосов. В результате установлено, что данные свойства сопоставимы с высокопрочным чугуном. В качестве исходных данных по нагрузке принимались значения давлений, которые возникают при образовании посадки с натягом между обоймой втулки и рабочей частью. Рассмотрены вопросы обрабатываемости резанием. Проведено сравнение использования втулки с элементом из серого чугуна и износостойкого с использованием дифференциального метода. **Практическая значимость.** Разработанная конечно-элементная модель дает возможность исследовать взаимодействие элементов цилиндрических втулок буровых насосов. При этом имеется возможность изменения действующих усилий и размеров, а также геометрической конфигурации деталей, что позволяет расширить область применения модели. Использование полученных результатов на стадии проектирования узлов машин дает возможность повысить качество продукции за счет грамотного выбора параметров соединения. Также имеется возможность снизить себестоимость продукции за счет применения более дешевого материала и снижения затрат на изготовление. Получены предварительные рекомендации по режимам обработки резанием.

**Ключевые слова:** качество, втулка насоса, чугун, упрочнение, качество поверхностного слоя, технология

© Некрасов Р.Ю., Овсянников В.Е., Губенко А.С., 2025

### Для цитирования

Некрасов Р.Ю., Овсянников В.Е., Губенко А.С. Повышение качества втулок цилиндров буровых насосов на основе использования серого чугуна с упрочненным слоем // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 128-133. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-128-133>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



# IMPROVING THE QUALITY OF DRILLING PUMP CYLINDER LINERS BASED ON THE USE OF GRAY IRON WITH A HARDENED LAYER

Nekrasov R.Yu., Ovsyannikov V.Ye., Gubenko A.S.

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** Drilling pumps are widely used by enterprises of the fuel and energy complex during the development of new fields. Structurally, the drilling pump is a set of equipment. At the same time, the quality of functioning of the entire unit as a whole depends on its individual elements. One of the “weak points” in this case are cylinder units. The risk analysis carried out by the authors showed that this is the most vulnerable part of the equipment. The main reason for the failure of this unit is a violation of the performance of the cylinder liner. In this case, the liners of the cylinders of drilling pumps are most often made of two components: a liner of cast iron is pressed into a steel cage. After assembly, finishing machining is required. At the same time, the use of hardened wear-resistant cast iron reduces the efficiency of cutting. In this paper, the possibility of replacing a liner made of high-strength cast iron with a liner made of gray cast iron, which has been subjected to surface strengthening, is considered. **Objectives** are improving the quality of cylinder assemblies of drilling pumps based on the use of liners made of gray cast iron with a hardened layer. **Methods used.** The paper uses methods of experiment planning, strength calculations, qualimetric evaluation, finite element method, cutting theory. **Novelty.** The manufacture of wear-resistant elements is carried out using a new method of thermodiffusion hardening by heating in contact with oxides of alloying elements. This makes it possible to obtain a layer with an inverse hardness distribution on the surface of gray cast iron. A comprehensive study has been carried out, which makes it possible to replace wear-resistant cast iron with a gray reinforced layer. **Result.** Studies of the effect of surface strengthening of gray cast iron by heating in contact with a mixture of oxides of alloying elements on the strength and rigidity of cylinder liners of drilling pumps were carried out. As a result, it was found that these properties are comparable to high-strength cast iron. As initial data on the load, the pressure values that arise during the formation of an interference fit between the liner cage and the working part were taken. The issues of machinability by cutting are considered. The use of a liner with a grey cast iron element and a wear-resistant one is compared using the differential method. **Practical Relevance.** The developed finite element model makes it possible to study the interaction of elements of the cylinder liner of drilling pumps. You can change the forces and dimensions involved, as well as the geometric configuration of the parts, to expand the scope of the model. The use of the obtained results at the design stage of machine components makes it possible to improve the quality of products due to the competent selection of connection parameters. It is also possible to reduce the cost of production by using a cheaper material and reducing manufacturing costs. Preliminary recommendations for cutting modes have been received.

**Keywords:** quality, pump liner, cast iron, hardening, surface layer quality, technology

## For citation

Nekrasov R.Yu., Ovsyannikov V.Ye., Gubenko A.S. Improving the Quality of Drilling Pump Cylinder Liners Based on the Use Of Gray Iron with a Hardened Layer. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 128-133. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-128-133>

## Введение

Буровые насосы типа УНБТ широко используются организациями топливно-энергетического комплекса Российской Федерации. Данные устройства являются составными частями буровых установок. Основная задача насоса бурового заключается в осуществлении прокачки бурового раствора.

Анализируя данные по отказам элементов оборудования [1-3], были получены данные по среднему расходу деталей бурового насоса в зависимости от наработки, которые приведены в табл. 1.

Однако информация, которая представлена в табл. 1, не дает полной картины, так как рассматриваемые элементы имеют разную трудоемкость изго-

Таблица 1. Данные по наработке на отказ деталей насосов буровых (расход деталей  $N \cdot 10^4$ )  
Table 1. Data on time for failures of drilling pump parts (parts consumption  $N \cdot 10^4$ )

Деталь насоса	1 год эксплуатации	2 года эксплуатации	3 года эксплуатации	4 года эксплуатации	5 лет эксплуатации	6 лет эксплуатации	7 лет эксплуатации
Клапан	8,8	10	13,7	16,2	22,7	30,0	35,0
Шток поршней	4,8	5,0	5,15	8,2	9,0	13,5	15,2
Втулка цилиндров	4,8	5,0	5,15	7,6	8,0	11,9	14,4
Поршень	5,2	6,2	8,4	12,4	15,4	18,9	25,0

товления, а следовательно, и себестоимость. В этом свете удобнее проводить количественную оценку на основе расчета величины риска [4, 5]. Количественно значение риска можно определить по расчетной зависимости вида

$$R = P \cdot X, \quad (1)$$

где  $P$  – вероятность выхода из строя;  $X$  – значение ущерба, руб.

Оценка величины ущерба в данной работе производилась затратным методом [6], то есть производилась калькуляция затрат на восстановление соответствующего вышедшего из строя объекта. На **рис. 1** приведены результаты расчета величины риска по видам деталей, представленных выше.

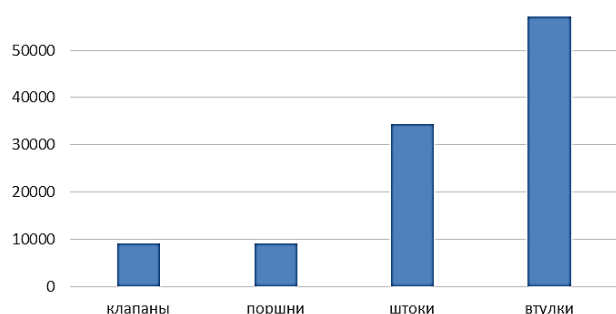


Рис. 1. Данные по рискам выхода из строя элементов бурового насоса

Fig. 1. Data on risks of failure of drilling pump components

Из полученных данных, которые приведены в **табл. 1** и на **рис. 1**, можно сделать вывод, что, несмотря на самую высокую частоту отказов (для клапанов), наиболее уязвимым элементом являются цилиндрические втулки. Основной причиной выхода их из строя является механическое изнашивание. В целях повышения долговечности цилиндрические втулки часто изготавливают сборными, причем рабочая часть выполняется из чугуна. Традиционно для изготовления рабочей части втулок используется дорогостоящий легированный чугун с шаровидным графитом. В качестве упрочнения применяется закалка. К основным недостаткам в данном случае относится высокая стоимость и плохие литейные свойства данных марок чугунов.

В рамках данной работы рассматривается возможность замены материала на серый чугун, который подвергнут поверхностному упрочнению нагревом в контакте со смесью легирующих элементов [7]. Микроструктура слоя приведена на **рис. 2**.

В ходе предварительных исследований было установлено, что слой имеет толщину до 3 мм (что в 10-50 раз превышает аналоги), обратное распределение твердости и ферритную кайму на поверхности (толщиной 0,1–0,3 мм). При этом наличие ферритной каймы дает возможность повысить эффективность механической обработки детали после упрочнения.

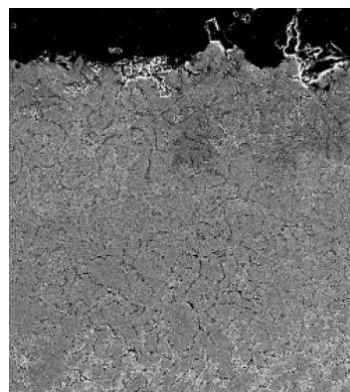


Рис. 2. Микроструктура упрочненного слоя,  $\times 100$   
Fig. 2. Hardened layer microstructure,  $\times 100$

### Материалы и методы исследования

Исследование физико-механических свойств втулок выполнялось с использованием метода конечных элементов. Исходные данные для построения конечно-элементной модели брались с результатов исследования образцов, полученных экспериментально. Исследовались свойства втулок из закаленного чугуна марки ЧХ-22 ГОСТ 7769-82, серого чугуна марки СЧ-20 ГОСТ 1412-85 и серого чугуна СЧ-20 с упрочненным слоем. В качестве вычислительной среды использовался программный пакет Solid Works.

В расчетных моделях нагружение принималось равным величине давления, которое возникает при образовании натяга в соединении между обоймой и рабочей частью втулки. Согласно рабочей документации, размер составляет  $\varnothing 172 \frac{+0.063}{+0.480}$ . Требуемая  $+0.040$

величина натяга определяется по следующему выражению [8]:

$$N_{\min} \geq p_{\min} \cdot d \cdot \left( \frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right) \cdot 10^6, \quad (2)$$

где  $p_{\min}$  – необходимое давление в месте контакта деталей;  $d$  – диаметр сопряжения;  $E$  – модули продольной упругости материалов деталей;  $C$  – коэффициенты Ляме.

Из выражения (2) определялась искомая величина давления. В ходе расчетов определялись напряжения во втулке и деформации. Также измерялась твердость образцов с использованием портативного твердомера.

Сравнение рассматриваемых вариантов производилось на основе квалитетической оценки дифференциальным методом [9]. За базовый образец принимались втулки, изготавливаемые с использованием износостойких чугунов. В качестве показателей для сравнения были использованы:

- значения напряжений по Мизесу;
- эквивалентная деформация;
- толщина упрочненного слоя;
- твердость;

- период стойкости реза;
- себестоимость изготовления.

Для обеспечения корректности сравнения твердость всех вариантов изготовления втулок переводилась в шкалу Бринелля. Себестоимость изготовления оценивалась по величине приведенных затрат [10].

Механическая обработка образцов производилась на токарном станке с числовым программным управлением марки dmgt mori seoline. В качестве режущего инструмента использовались стандартные резцы со сменными многогранными пластинами. Были проведены стойкостные испытания. При этом устанавливалось фиксированное значение глубины резания, равное  $t = 0,2$  мм. Величина продольной подачи составляла  $S = 0,25$  мм/об. Скорость резания  $V = 180$  м/мин.

Обрабатывались образцы из серого чугуна марки СЧ-20 с упрочненным слоем и износостойкого чугуна марки ЧХ-22 после закалки. Учитывая тот факт, что рассматривается чистовая обработка, в качестве критерия стойкости инструмента принималась шероховатость обработанной поверхности. Измерение шероховатости производилось на профилографе марки Mitutoyo Sufest SJ-500.

За предельное значение шероховатости обработанной поверхности принималась величина  $Ra = 3,2$  мкм, так как это предельное значение среднеарифметического отклонения профиля, установленное конструкторской документацией производителя втулок цилиндрических.

### Полученные результаты и их обсуждение

На рис. 3 показан пример расчета напряжений, на рис. 4 – пример расчета деформаций.

Определение размеров сетки и проверка адекватности полученных результатов выполнялось на основе сравнения данных, полученных на рис. 3, с результатами испытаний образца на прессе. Погрешность не превышала 10%. Аналогичные исследования были проведены для серого чугуна с упрочненным слоем. В результате было установлено, что по прочности образцы из серого чугуна с упрочненным слоем уступают износостойкому чугуну не более чем на 10%. По эквивалентной деформации (пример расчета на рис. 4) предлагаемый вариант уступает базовому до 25%. Однако данные характеристики материала вполне удовлетворительные с точки зрения служебного назначения, так как в результате моделирования было установлено, что рабочая часть цилиндрических втулок из серого чугуна с упрочненным слоем выдерживает усилие запрессовки с коэффициентом запаса прочности, равного 2. В то же время серый чугун без упрочнения таких нагрузок не выдерживает.

В ходе исследования процессов механической обработки образцов из серого чугуна с упрочненным слоем было установлено, что при удалении ферритного слоя образуется стружка, которая по конфигурации соответствует неупрочненному серому чугуну. Также были получены зависимости  $Ra$  обработанной

поверхности от основного времени. На рис. 5 приведен пример зависимости при обработке серого чугуна с упрочненным слоем.

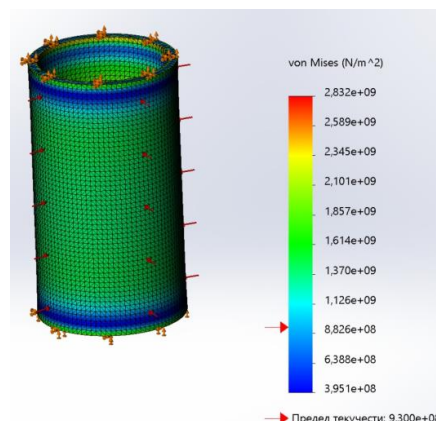


Рис. 3. Пример расчета напряжений (втулка из чугуна ИЧ-22)

Fig. 3. Stress calculation example (cast iron liner ICh-22)

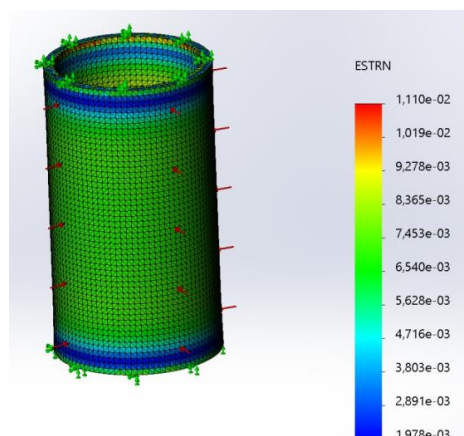


Рис. 4. Пример расчета деформаций (втулка из чугуна ИЧ-22)

Fig. 4. Example of deformation calculation (cast iron liner ICh-22)

$Ra$ , мкм

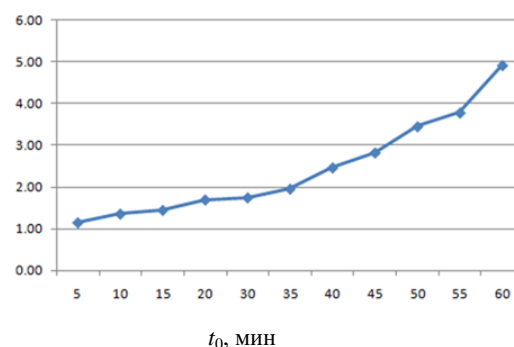


Рис. 5. Зависимость среднеарифметического отклонения  $Ra$  от основного времени  $t_0$ , мин

Fig. 5. The dependence of the arithmetic mean deviation of  $Ra$  on the basic time  $t_0$ , min

Сравнение вариантов требует оценки рассматриваемых альтернатив по ряду критериев. Для сравнения вариантов будем использовать дифференциальный метод сравнения. В качестве критериев для сравнения возьмем следующие:

- напряжение по Мизесу и эквивалентную деформацию. Данные показатели характеризуют возможность реализации служебного назначения детали, главное требование в данном случае – способность выдержать усилие запрессовки;

- толщина упрочненного слоя, твердость и период стойкости резца при обработке материала. Данные показатели характеризуют технологические свойства;

- для оценки экономических аспектов применяется расчет себестоимости.

Результаты расчетов коэффициентов сравнения приведены в **табл. 2**.

В результате расчетов (см. **табл. 2**) однозначный вывод сделать нельзя. В этом случае целесообразно оценить уровень качества на основе определения значений показателей качества с использованием дифференциального метода оценки [9]. Значения показателей качества оцениваемых альтернатив:

$$y_{K1} = \frac{0,7 + 0,3 + 1 + 0,4 + 2,2 + 2,7}{6} = 1,21; \quad (3)$$

$$y_{K2} = \frac{0,97 + 0,75 + 0,86 + 0,95 + 2,5 + 2}{6} = 1,33. \quad (4)$$

### Заключение

В результате расчетов показателей качества по рассматриваемой системе критериев оба варианта превышают базовый (и использование серого чугуна и серый чугун с упрочненным слоем). Однако использование дифференциального метода оценки на основе усреднения показателей имеет существенный недостаток ввиду того, что все критерии являются равнозначными. Поэтому полученные результаты требуют дополнительного анализа:

- было установлено, что обе альтернативы превышают базовый вариант;

- превышение достигнуто за счет показателей, которые характеризуют обрабатываемость материала и себестоимость;

- в ходе расчетов установлено, что серый чугун без упрочнения не выдерживает нагрузок при запрессовке, поэтому не может быть использован в конструкциях цилиндрических узлов буровых насосов;

- использование серого чугуна с упрочненным слоем обеспечивает выполнение служебного назначения и при этом существенно дешевле и технологичнее при изготовлении.

На основании изложенного выше можно сделать вывод о том, что использование серого чугуна с упрочненным слоем для изготовления рабочей части втулок цилиндрических узлов буровых насосов является альтернативой износостойкому чугуну.

Как перспективу для дальнейших исследований, целесообразно рассмотреть в качестве критериев помимо указанных в данной работе еще и долговечность, рабочие характеристики пары втулка-поршень и т.д.

Также следует отметить, что вопросы обработки резанием в данной работе рассмотрены предварительно. В качестве направления для дальнейших исследований целесообразно провести оптимизацию режимов обработки по критерию производительности.

### Список источников

1. Харисов М.И., Забиров Ф.Ш. Обоснование направлений совершенствования клапанных пар поршневого бурового насоса с целью повышения наработки на отказ и герметичности // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2019. №2. С. 113-128.
2. Харисов М.И., Забиров Ф.Ш. Совершенствование конструкции клапанной пары бурового насоса // 69-я науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: сб. матер. докл. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018. 249 с.
3. Харисов М.И., Забиров Ф.Ш. Исследование способов и методов повышения надежности клапанной пары бурового насоса // Современные технологии в нефтегазовом деле – 2018: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. В 2 т. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018. Т. 2. С. 126–127.
4. Методы и инструменты управления рисками на высокотехнологичном машиностроительном предприятии, оснащенном виброактивным оборудованием / Лончих П.А., Головина Е.Ю., Лончих Н.П., Лившиц И.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 170-180. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-170-180>

Таблица 2. Результаты расчетов величины коэффициентов сравнения

Table 2. The results of calculations of the comparison coefficients

Наименование показателей качества, единицы измерения	Значения показателей качества $P_{iO}, P_{iB}$			Формула	$y_{1i}$	$y_{2i}$
	СЧ-20	СЧ20+упрочнение	Базовый образец ЧХ-22			
Напряжение по Мизесу (von Mises), Н/мм <sup>2</sup>	$4,2 \cdot 10^9$	$2,9 \cdot 10^9$	$2,8 \cdot 10^9$	$P_{iB}/P_{iO}$	0,7	0,97
Эквивалентная деформация, ESTRN	$3,5 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$P_{iB}/P_{iO}$	0,3	0,75
Толщина упрочненного слоя, мм	7	6	7	$P_{iO}/P_{iB}$	1	0,86
Твердость, HB	240	580	618	$P_{iO}/P_{iB}$	0,4	0,95
Период стойкости резца, мин	50	45	18	$P_{iO}/P_{iB}$	2,7	2,5
Себестоимость, руб.	14000	16000	32000	$P_{iB}/P_{iO}$	2,2	2



5. ГОСТ РВ 0015-002-2020. Система разработки и постановки на производство военной техники. Системы менеджмента качества. Общие требования. <https://euro-register.ru>
6. Гаврилова С.В. Концептуальные основы определения высокотехнологичного сектора экономики и функционирования высокотехнологичных компаний // Статистика и экономика. 2014. №2. С. 53-57.
7. Пат. 2493289 РФ. Способ диффузионного титанирования изделий из чугуна / Овсянников В.Е., Гуревич Ю.Г., Фролов В.А., Суханов П.А.; заявитель и патентообладатель Курганский государственный университет; опубл. 20.09.2013. Бюл. № 26.
8. Основы взаимозаменяемости: учеб. пособие для вузов / Гольгин Н.Х., Педь С.Е., Дружинин П.В., Бойцов А.Г. М.: Изд-во МИИГАиК, 2020. 316 с.
9. Асаул В.В., Кошечев В.А., Цветков Ю.А. Оценка конкурентоспособности организаций в условиях цифровой экономики // Вопросы инновационной экономики. 2020. №1. С. 533-547
10. Безъязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения: монография. М.: Инфра-инженерия, 2021. 356 с.
4. Lontsikh P.A., Golovina E.Yu., Lontsikh N.P., Livshits I.I. Methods and tools for risk management at a high-tech machine-building enterprise equipped with vibroactive equipment. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2024;22(2):170-180. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-170-180>.
5. State standard GOST RV 0015-002-2020. The system for the development and production of military equipment. Quality management systems. General requirements. Available at: <https://euro-register.ru>
6. Gavrilova S.V. A conceptual framework for determining a high-tech sector of the economy and functioning high-tech companies. *Statistika i ekonomika* [Statistics and Economics]. 2014;(2):53-57. (In Russ.)
7. Ovsyannikov V.E., Gurevich Yu.G., Frolov V.A., Sukhanov P.A. *Sposob diffuzionnogo titanirovaniya izdelij iz chuguna* [Method of diffusion titaniation of cast iron products]. Patent RU, no. 2493289, 2013.
8. Golygin N.Kh., Pedi S.E., Druzhinin P.V. Boitsov A.G. *Osnovy vzaimozamenyaemosti: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Fundamentals of interchangeability: A textbook for universities]. Moscow: Publishing house MSUGC, 2020, 316 p. (In Russ.)
9. Asaul V.V., Koshchev V.A., Tsvetkov Yu.A. Assessing competitiveness of organizations in the digital economy. *Voprosy innovatsionnoy ekonomiki* [Issues of Innovative Economics]. 2020;(1):533-547. (In Russ.)
10. Bezyazuchnuy V.F. *Metod podobiya v tekhnologii mashinostroeniya: monografiya* [Similarity method in mechanical engineering technology: monograph]. Moscow: Infra Engineering, 2021, 356 p. (In Russ.)

## References

Поступила 09.10.2024; принята к публикации 17.03.2025; опубликована 30.06.2025  
Submitted 09/10/2024; revised 17/03/2025; published 30/06/2025

**Некрасов Роман Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент,  
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.  
Email: [syncler@mail.ru](mailto:syncler@mail.ru). ORCID 0009-0002-0057-8550

**Овсянников Виктор Евгеньевич** – доктор технических наук, доцент,  
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.  
Email: [vik9800@mail.ru](mailto:vik9800@mail.ru). ORCID0000-0002-8775-0781

**Губенко Арсений Сергеевич** – аспирант,  
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.  
Email: [gubenkoas@tyuiu.ru](mailto:gubenkoas@tyuiu.ru). ORCID 0009-0007-3108-3127

**Roman Yu. Nekrasov** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.  
Email: [syncler@mail.ru](mailto:syncler@mail.ru). ORCID 0009-0002-0057-8550

**Victor E. Ovsyannikov** – DrSc (Eng.), Associate Professor,  
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.  
Email: [vik9800@mail.ru](mailto:vik9800@mail.ru). ORCID0000-0002-8775-0781

**Arseniy S. Gubenko** – Postgraduate Student,  
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.  
Email: [gubenkoas@tyuiu.ru](mailto:gubenkoas@tyuiu.ru). ORCID 0009-0007-3108-3127



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 669.017  
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-134-139

## ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ, НА СВОЙСТВА ЭЛЕКТРООСАЖДЕННЫХ ХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ

Чаугарова Л.З., Неупокоева А.А., Ковенский И.М.

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

**Аннотация.** Исследованы электролитические покрытия хрома толщиной 20 и 40 мкм, полученные электроосаждением по стандартным методикам. Такие покрытия нашли широкое применение в машиностроении, авиационной и автомобильной промышленности, а также в производстве инструментов и деталей, эксплуатируемых в условиях повышенных нагрузок и агрессивных сред. Для изучения возможности повышения твердости, износостойкости и коррозионной стойкости этих покрытий было изучено влияние термической и химико-термической обработки на микроструктуру и коррозионную стойкость. Исследовано распределение внутренних напряжений, которые оказывают существенное влияние на физико-механические свойства покрытия, и показано, что внутренние напряжения электроосажденных хромистых покрытий зависят от концентрации дефектов кристаллического строения. Превалирующий в структуре покрытия тип дефекта обусловлен свойствами металла и условиями электролиза, а также воздействием термической и химико-термической обработки, которые определяют величину и знак внутренних напряжений. Выявлено превалирующее влияние точечных дефектов кристаллического строения на величину внутренних напряжений. Показано, что при цементации хромистых покрытий растягивающие напряжения в покрытии изменяются на сжимающие и в результате этого коррозионная стойкость электроосажденного хромистого покрытия после термической обработки повышается в два раза, а цементация этого покрытия дополнительно повышает твердость и коррозионную стойкость. Микротвердость покрытия после химико-термической обработки, как после цементации, так и после азотирования, возрастает. А коррозионная стойкость электроосажденного хрома после азотирования понизилась из-за наличия пор и каналов.

**Ключевые слова:** электроосажденные покрытия, свойства покрытий, коррозионная стойкость, эксплуатационные свойства, структура, внутренние напряжения, химико-термическая обработка

*Статья подготовлена в рамках реализации гранта ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» (проект «Исследование структуры и свойств электролитических покрытий, пригодных к эксплуатации в сложных природно-климатических условиях»).*

© Чаугарова Л.З., Неупокоева А.А., Ковенский И.М., 2025

### Для цитирования

Чаугарова Л.З., Неупокоева А.А., Ковенский И.М. Влияние внутренних напряжений, возникающих при воздействии химико-термической обработки, на свойства электроосажденных хромовых покрытий // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 134-139. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-134-139>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# THE INFLUENCE OF INTERNAL STRESSES ARISING WHEN EXPOSED TO CHEMICAL AND THERMAL TREATMENT, ON THE PROPERTIES OF ELECTRODEPOSITED CHROMIUM COATINGS

Chaugarova L.Z., Neupokoeva A.A., Kovenskiy I.M.

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**Abstract.** Electrolytic chromium coatings with a thickness of 20 and 40 microns obtained by electrodeposition using standard methods have been studied. Such coatings are widely used in mechanical engineering, the aviation and automotive industries, as well as in the manufacture of tools and parts operated under high loads and aggressive environments. To study the possibility of increasing the hardness, wear resistance, and corrosion resistance of these coatings, the effects of thermal and chemical heat treatment on the microstructure and corrosion resistance were studied. The distribution of internal stresses, which have a significant effect on the physico-mechanical properties of the coating, has been studied and it has been shown that the internal stresses of electrodeposited chromium coatings depend on the concentration of defects in the crystalline structure. The type of defect prevailing in the coating structure is due to the properties of the metal and the conditions of electrolysis, as well as the effects of thermal and chemical heat treatment, which determine the magnitude and sign of internal stresses. The prevailing influence of point defects of the crystalline structure on the magnitude of internal stresses has been revealed.

**Keywords:** electrodeposited coatings, coating properties, corrosion resistance, operational properties, structure, internal stresses, chemical and thermal treatment

*The article was prepared within the framework of the grant of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Tyumen Industrial University" (project "Study of the structure and properties of electrolytic coatings suitable for use in difficult natural and climatic conditions").*

## For citation

Chaugarova L.Z., Neupokoeva A.A., Kovenskiy I.M. The Influence of Internal Stresses Arising when Exposed to Chemical and Thermal Treatment, on the Properties of Electrodeposited Chromium Coatings. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 134-139. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-134-139>

## Введение

Электроосажденные покрытия благодаря своим эксплуатационным характеристикам, таким как высокая твердость, износостойкость, коррозионная стойкость и декоративные качества, широко используются в машиностроении, авиационной и автомобильной промышленности, а также в производстве инструментов и деталей, эксплуатируемых в условиях повышенных нагрузок и агрессивных сред. Однако потенциал, связанный с их химико-термической обработкой (ХТО), раскрыт не полностью, также особый интерес вызывают внутренние напряжения (ВН), которые оказывают существенное влияние на физико-механические свойства покрытия. Они могут приводить либо к снижению прочности сцепления покрытия с основой, к растрескиванию поверхности, к отслаиванию, либо, наоборот, к повышению твердости, износостойкости покрытий, к улучшению коррозионной стойкости [1-10].

Основными причинами, вызывающими внутренние напряжения в покрытиях, принято считать наличие примесей, несовершенства кристаллической решетки, форму и размер кристаллитов, степень неоднородности покрытий.

Возникновение ВН связано как с условиями электрокристаллизации, так и с природой осаждаемых

элементов. Имеются работы, в которых рассматриваются вопросы по влиянию ВН электроосажденных покрытий на их свойства в зависимости от вида термической обработки. Однако вопросы влияния химико-термической обработки на ВН электролитических покрытий и их свойства раскрыты не в полной мере. В связи с этим целью работы являлось изучение влияния химико-термической обработки – цементации и азотирования – на ВН электроосажденного хрома, а также влияние ВН на коррозионную стойкость данных покрытий.

## Материалы и методы исследования

Хромовые покрытия получали при стандартных условиях (температура электроосаждения 50-60°C, плотность тока 45-65 А/дм<sup>2</sup>), используя хромовый ангидрид и серную кислоту.

После электроосаждения часть образцов подвергалась термической обработке (отжигу в вакуумной печи при температуре 400°C), вторая часть подвергалась ХТО – цементации и азотированию.

Цементация проводилась при температуре 925°C в течение 3,5 ч. Более подробное описание процесса указано в работе [4]. Азотирование проводилось при 480±10°C в среде хлористого аммония NH<sub>4</sub>Cl и аммиака NH<sub>3</sub> в течение 30 мин, осуществлялось в двух

вариантах: азотирование без последующего отжига (без ТО) и азотирование с последующим отжигом в вакуумной печи при температуре 850°C.

В работе определялись: коррозионная стойкость гравиметрическим методом; микротвёрдость (ПМТ-3М); микроструктура (Olympus GX51); внутренние напряжения по методу Н.Н. Давиденкова (ПИОН-2).

### Полученные результаты и их обсуждение

Согласно имеющимся данным, электроосажденные покрытия металлами делятся на три группы по виду возникающих внутренних напряжений. Хром относится к первой группе металлов, осаждение которых происходит с высоким перенапряжением катода, сопровождающееся выделением водорода. Совокупность этих факторов приводит к образованию точечных дефектов в виде вакансий, что влечет за собой образование ВН растяжения.

При сравнении ВН электроосажденного хрома с толщиной 20 и 40 мкм (рис. 1) наблюдается граница перехода ВН между покрытием и основой на глубинах соответственно 20 и 37 мкм. При переходе происходит смена знака напряжения, то есть изменение растягивающих напряжений в покрытии на сжимающие в основе. Получается, что при большей толщине осадка наблюдаются меньшие внутренние напряжения в переходной зоне между осадком и подложкой (при 20 мкм  $VH = -27$  кгс/мм<sup>2</sup>, при 40 мкм  $VH = -18$  кгс/мм<sup>2</sup>). Причина становится понятной из анализа структуры покрытий (рис. 2), которая неоднородна по толщине

ввиду специфических особенностей электрокристаллизации. Слои, прилегающие к подложке, характеризуются высокими дисперсностью и дефектностью, а их кристаллиты – высокой степенью разориентации. С увеличением толщины растущего на катоде осадка размер слагающих его зерен постепенно увеличивается, а затем стабилизируется, соответственно, снижается количество дефектов кристаллической решетки, в частности вакансий. Последнее приводит к уменьшению величины ВН растяжения в электроосажденных тугоплавких металлах до некоторого постоянного значения [5].

На графике наблюдается скачкообразное изменение эпюр напряжений, связанное с неравномерным распределением осаждаемых элементов в толще катодного осадка, что также подтверждается микроструктурой электроосажденного хрома (рис. 2, а), где наблюдается слоистость структуры.

При воздействии ХТО происходит включение в кристаллическую решетку электроосажденного металла атомов диффундируемого вещества – в нашем случае это углерод и азот.

Согласно данным рентгенофазового анализа хромовых покрытий, которые представлены в табл. 1, при диффузионном насыщении углеродом/азотом наблюдается изменение кристаллической решетки из-за образования карбидов хрома и нитридов хрома соответственно. Исходя из этого, при сравнении рис. 1 и 2, 1 и 3 наблюдается смена знака ВН.

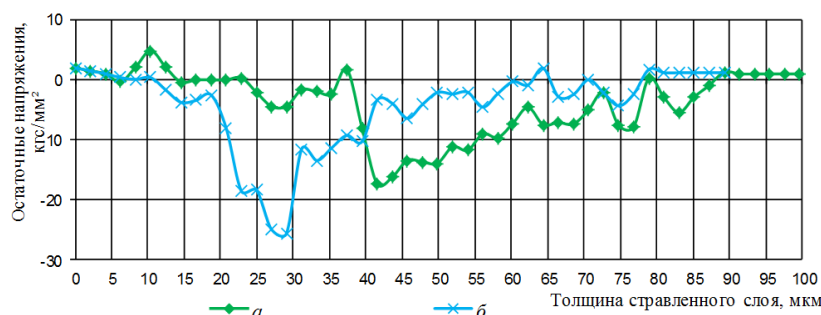


Рис. 1. Зависимость внутренних напряжений от глубины стравленного слоя:

а – электроосажденный хром без ХТО (40 мкм); б – электроосажденный хром без ХТО (20 мкм)

Fig. 1. Dependence of internal stresses on the depth of the etched layer: а is electrodeposited chromium without CTO (40 microns), б is electrodeposited chromium without CTO (20 microns)

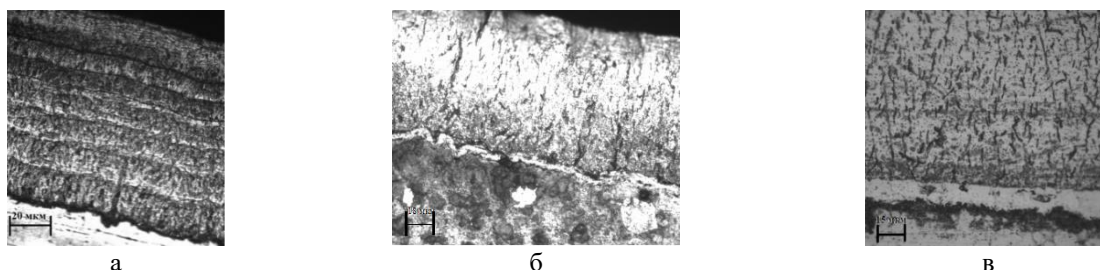


Рис. 2. Микроструктура хромового осадка (толщина 100 мкм):

а – без ХТО; б – с цементацией; в – с азотированием и отжигом в вакуумной печи

Fig. 2. Microstructure of the chromium deposit (thickness 100 microns):

а is without CTO; б is with cementation; в is with nitriding and annealing in a vacuum furnace



Таблица 1. Рентгенофазовый анализ хромовых покрытий без ХТО и хромовых покрытий с ХТО  
Table 1. X-ray phase analysis of chrome coatings without CTO and chrome coatings with CTO

Тип образцов	Фазы	Параметры решетки, Å		
		a	b	c
Электроосажденный хром без ХТО	Cr	2,903	-	-
Электроосажденный хром с ХТО (цементацией)	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	10,6595	10,6595	10,6595
	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	7,010	12,142	4,526
Электроосажденный хром с ХТО и ТО (азотированием+ отжигом в вакуумной печи)	Cr <sub>2</sub> N	4,752	4,752	4,429

Установлено, что ХТО приводит к более плавному переходу ВН от электролитического покрытия к подложке (рис. 3, 4), в результате наблюдаются малонапряженные ( $-2,5 \text{ кгс/мм}^2$ ) слои. В процессе электроосаждения поверхностный слой покрытия пересыщен точечными дефектами. После ХТО атомы металла приобретают более упорядоченную структуру осадка (рис. 2 б, в), атомы диффундирующего металла стремятся занять места в вакансиях. При этом происходит снижение концентрации точечных дефектов, особенно это наблюдается в приповерхностной зоне покрытия, приводящее к смене знака.

Также при сравнении электроосажденного хрома без ХТО (табл. 2) при большей толщине осадка наблюдаются меньшие внутренние напряжения в переходной зоне между осадком и подложкой, в отли-

чие от электроосажденного хрома с ХТО, в этом случае чем больше толщина осадка, тем характерны большие сжимающие напряжения. Это объясняется тем, что электроосажденный слой с толщиной 40 мкм имеет меньше дефектов кристаллического строения, как было указано выше, а после ХТО атомы диффундирующего элемента стремятся занять места вакансий. Следовательно, за одинаковый период времени проведения ХТО при толщине хромового осадка 40 и 20 мкм требуется меньше затратить времени для структурирования кристаллической решетки для осадка с толщиной именно 40 мкм с меньшими внутренними дефектами. Это и обуславливает большие сжимающие внутренние напряжения в осадке с большей толщиной.

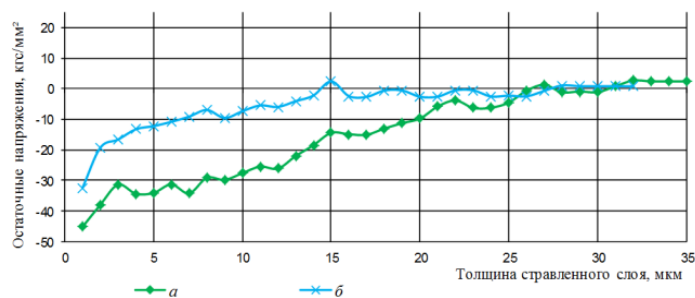


Рис. 3. Зависимость внутренних напряжений от глубины стравленного слоя: а – электроосажденный хром (40 мкм) с цементацией; б – электроосажденный хром (20 мкм) с цементацией

Fig. 3. Dependence of internal stresses on the depth of the etched layer: a is electrodeposited chromium (40 microns) with cementation; b is electrodeposited chromium (20 microns) with cementation

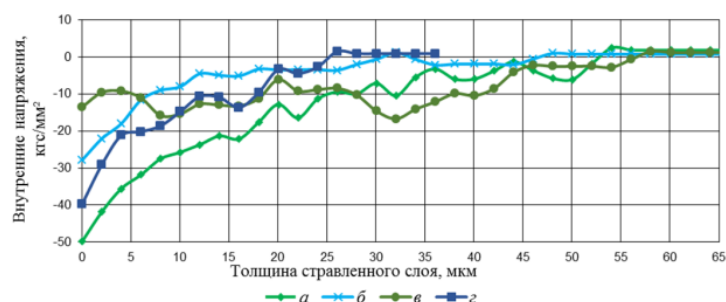


Рис. 4. Зависимость внутренних напряжений от глубины стравленного слоя: а – электроосажденный хром (40 мкм) с азотированием без ТО; б – электроосажденный хром (20 мкм) с азотированием без ТО; в – электроосажденный хром (40 мкм) с азотированием и отжигом в вакуумной печи; г – электроосажденный хром (20 мкм) с азотированием и отжигом в вакуумной печи

Fig.4. Dependence of internal stresses on the depth of the etched layer: a is electrodeposited chromium (40 microns) with nitriding without TO; б is electrodeposited chromium (20 microns) with nitriding without TO; в is electrodeposited chromium (40 microns) with nitriding and annealing in a vacuum furnace; г is electrodeposited chromium (20 microns) with nitriding and annealing in a vacuum furnace

Таблица 2. Значения сжимающих внутренних напряжений в зависимости от толщины осадка  
Table 2. Values of compressive internal stresses depending on the thickness of the deposit

Толщина осадка, мкм	Максимальные значения сжимающих внутренних напряжений в электроосажденном хроме, кгс/мм <sup>2</sup>		
	без ХТО	с ХТО	
40	-18	с цементацией	с азотированием
20	-27	-45	-50
		-32	-28

На основе сравнительного анализа изменений внутренних напряжений от типа покрытий (рис. 5) следует отметить:

– ТО в виде отжига в вакуумной печи при температуре 400°C приводит к релаксации ВН, так как происходит миграция и аннигиляция вакансий;

– ХТО приводит к смене знака ВН, что должно повлиять на эксплуатационные характеристики, рассмотренные далее.

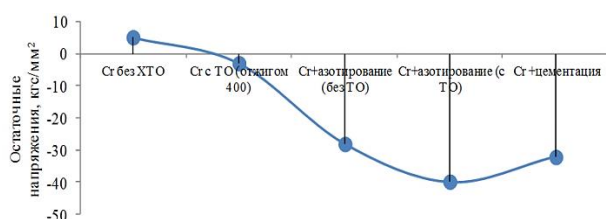


Рис. 5. Зависимость остаточных напряжений от вида получения покрытия

Fig. 5. Dependence of residual stresses on the type of coating

Внутренние напряжения могут сказываться на коррозионном поведении электроосажденного хрома, влияя на его способность к защите от коррозии.

При изучении микротвердости и коррозионной стойкости (рис. 6) использовались покрытия с толщиной электроосажденного хрома 20 мкм. Обнаружено, что коррозионная стойкость образцов после погружения в 3%NaCl+0,5%CH<sub>3</sub>COOH (pH = 2,86) в течение 30 дней выше у хромистого осадка, прошедшего цементацию, однако электроосажденный хром с азотированием показал наихудший результат по коррозионной стойкости из-за наличия пор и каналов (см. рис. 2, в).

При изучении микротвердости наблюдается снижение данного показателя после всех видов ХТО. Причина снижения твердости связана с миграцией и аннигиляцией вакансий и атомов водорода. Происходит миграция вакансий, которая подтверждается уменьшением внутренних напряжений (сменой знака ВН), и после цементации также наблюдается увеличение периодов кристаллической решетки (см. табл. 1). Мигрируя к порам, вакансии увеличивают объем последних, уменьшая давление молекулярного водорода в них.

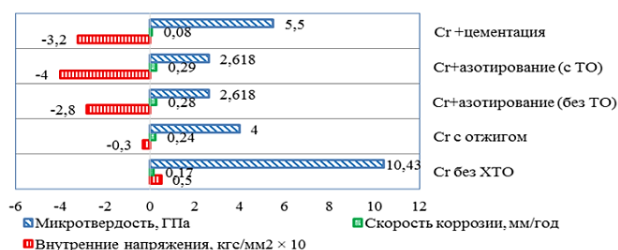


Рис. 6. Изменение скорости коррозии (агрессивная среда 3%NaCl + 0,5%CH<sub>3</sub>COOH (pH 2,86), твердости и внутренних напряжений покрытий хромом с различными видами ТО или ХТО

Fig. 6. Change in corrosion rate (aggressive medium 3%NaCl + 0.5%CH<sub>3</sub>COOH (pH 2.86), hardness and internal stresses of chromium coatings with various types of TO or CTO

### Закключение

Таким образом, установлено, что определяющее влияние на величину ВН, возникающих при электрокристаллизации, оказывают точечные дефекты кристаллического строения – вакансии и межузельные атомы; превалирующий в структуре покрытия тип дефекта обусловлен свойствами металла и условиями электролиза и воздействием термической и химико-термической обработки, определяющими величину и знак ВН.

Показано, что при воздействии ХТО происходит смена знака ВН (от растягивающих к сжимающим), что связано с внедрением диффундирующего элемента в места вакансий, а проведение ХТО приводит к более стабильному переходу от электроосажденного осадка к подложке, в результате чего наблюдаются малонапряженные слои перехода.

Цементация электроосажденного хрома приводит к улучшению коррозионной стойкости при испытании в стандартных коррозионных средах: 3%NaCl+0,5%CH<sub>3</sub>COOH (pH = 2,86) и 3%NaCl (pH = 7). Наблюдается повышение коррозионной стойкости электроосажденного хрома с цементацией в 2 и 3 раза соответственно по сравнению с электроосажденным хромом без ХТО.

# Список источников

1. Ковенский И.М., Поветкин В.В. Электролитические сплавы. М.: Интермет Инжиниринг, 2003. 288 с.
2. Ковенский И.М., Поветкин В.В. Металловедение покрытий: учебник для вузов. М.: Интермет Инжиниринг, 1999. 296 с.
3. Химико-термическая, электрофизическая обработка металлов, сплавов и гальванических покрытий: монография / В.Н. Гадалов, В.Р. Петренко, В.В. Пешков, С.В. Сафонов. М.: Аргамак-Медиа, 2013. 320 с.
4. Изменение структуры и свойств электроосажденного хрома в процессе цементации и азотирования / Л.З. Чаугарова, И.М. Ковенский, А.А. Кулемина, С.В. Малыш // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение. Материаловедение. 2024. Т. 26, № 1. С. 13–20.
5. Моргун А.И. Возникновение и релаксация внутренних напряжений в гальванических покрытиях: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01. Тюмень, 2003. 108 с.
6. Серебровский В.И. Электроосаждение двухкомпонентных покрытий на основе железа и их химико-термическая обработка для упрочнения и восстановления деталей машин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.01, 05.20.03. Курск, 2004. 362 с.
7. Архаров В.И., Немнонов С.А. Карбидизация электролитических осадков хрома // Известия АН СССР, 1943. № 9-10.
8. Ковенский И.М., Поветкин В.В. Методы исследования электролитических покрытий. М.: Наука, 1994. 234 с.
9. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов. М.: Metallurgiya, 1985. 256 с.
10. Кулемина А.А., Ковенский И.М. Применение электролитических никель-молибденовых покрытий для защиты деталей нефтепромышленного оборудования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т. 19, № 1. С. 35-41.

# References

1. Kovensky IM, Povetkin VV. Electrolytic Alloys. Moscow: Internet Engineering; 2003. 288 p. (In Russ.).
2. Kovenskii I.M., Povetkin V.V. Metallography of coatings. Moscow: Intermet Inzhiniring, 1999. 296 p. (In Russ.).
3. Gadalov V.N., Petrenko V.R., Peshkov V.V., Safonov S.V. Chemical-thermal, electrophysical treatment of metals, alloys and galvanic coatings: a monograph. Moscow: Argamak-Media, 2013. 320 p. (In Russ.).
4. Chaugarova L.Z., Kovenskii I.M., Kulemina A.A., Malyshev S.V. Change in the structure and properties of electrodeposited chromium during the cementation and nitriding process. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroyeniye. Materialovedeniye*. [Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science]. 2024;26(1):13–20. (In Russ.).
5. Morgun A.I. *Vozniknoveniye i relaksatsiya vnutrennih napryazheniy v gal'vanicheskikh pokrytiyakh: dis. ... kand. tekhn. nauk* [The origin and relaxation of internal stresses in galvanic coatings: PhD thesis]. Tyumen, Russia: 2003. 108 p.
6. Serebrovskiy V.I. *Elektroosazhdeniye dvukhkomponentnykh pokrytij na osnove zheleza i ih himiko-termicheskaya obrabotka dlya uprochneniya i vosstanovleniya detalej mashin: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Electrodeposition of two-component coatings based on iron and their chemical-thermal treatment for strengthening and restoration of machine parts: DrSc thesis]. Kursk, Russia: 2004. 362 p.
7. Arkharov V.I., Nemnonov S.A. Carbiding of electrolytic chromium deposits. *Izvestiya AN SSSR*. 1943;(9-10). (In Russ.).
8. Kovenskii I.M., Povetkin V.V. Methods for the study of electrolytic coatings. Moscow: Nauka, 1994. 234 p. (In Russ.).
9. Lakhtin Yu.M., Arzamasov B.N. Chemical-thermal treatment of metals. Moscow: Metallurgiya, 1985. 256 p. (In Russ.).
10. Kulemina A.A., Kovenskii I.M. Application of electrolytic nickel-molybdenum coatings for protecting parts of oilfield equipment. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. [Vestnik of Nostov Magnitogorsk State Technical University]. 2021;19(1):35-41. (In Russ.).

Поступила 07.05.2025; принята к публикации 19.05.2025; опубликована 30.06.2025  
Submitted 07/05/2025; revised 19/05/2025; published 30/06/2025

**Чаугарова Лариса Зиннуровна** – старший преподаватель,  
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.  
Email: chaugarovalz@tyuiu.ru, ORCID 0000-0002-6376-2868

**Неупокоева Алёна Александровна** – доцент,  
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.  
Email: neupokoevaa@tyuiu.ru, ORCID 0000-0003-2076-166X

**Ковенский Илья Моисеевич** – доктор технических наук, профессор,  
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.  
Email: kovenskijim@tyuiu.ru, ORCID 0000-0003-3241-8084

**Larisa Z. Chaugarova** – Senior Lecturer,  
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.  
Email: chaugarovalz@tyuiu.ru, ORCID 0000-0002-6376-2868

**Alena A. Neupokoeva** – Assistant of Professor,  
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.  
Email: neupokoevaa@tyuiu.ru, ORCID 0000-0003-2076-166X

**Ilya M. Kovenskiy** – DrSc (Eng.), Professor,  
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.  
Email: kovenskijim@tyuiu.ru, ORCID 0000-0003-3241-8084

## УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ.

## ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

## PRODUCT QUALITY MANAGEMENT. STANDARDIZATION. INDUSTRIAL MANAGEMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 658.562

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-140-147



### ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ И АДАПТИВНОСТИ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА С ПОЗИЦИИ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЦЕЛОСТНОСТИ (ЭМЕРДЖЕНТНОСТИ)

Антипов Д.В., Губанова О.Г.

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

**Аннотация.** Постановка задачи (актуальность работы). В современных условиях постоянных изменений на различных уровнях, а также повышения сложности технологий и общественного устройства наравне с результативностью и эффективностью приобретают особую ценность такие свойства системы менеджмента качества (СМК), как устойчивость и адаптивность. Предприятиям и СМК, как его части, необходимо быть устойчивыми к изменениям внешним и внутренним, чтобы сохранить свою целостность и стабильно функционировать. В то же время для использования новых возможностей, роста и развития требуются адаптивность и гибкость. Поэтому для достижения долгосрочных результатов предприятия необходима своевременная оценка устойчивости и адаптивности системы. **Цель работы.** Определение методики количественной оценки состояния СМК с позиции устойчивости и адаптивности на основе закономерности целостности (эмерджентности) общей теории систем. **Используемые методы.** В статье использованы методы системного анализа и общей теории систем, в частности исследована закономерность целостности (эмерджентности) применительно к системе менеджмента качества. Для расчета комплексных показателей устойчивости и адаптивности использована методология квалиметрии – комплексная оценка показателей совокупностей свойств. **Новизна.** Проведен анализ СМК на основе принципов и закономерностей общей теории систем. Определены комплексные показатели устойчивости и адаптивности системы. **Результаты.** По предложенной методике проведен расчет показателей адаптивности и устойчивости действующего предприятия автомобилестроения, выпускающего свинцово-кислотные стартерные аккумуляторы за период 2019–2023 гг. На основе расчетных данных построено графическое изображение динамики показателей. Проведен анализ полученных результатов, выявлено соответствие системной закономерности целостности (эмерджентности). **Практическая значимость.** Своевременная оценка СМК с помощью комплексных показателей устойчивости и адаптивности позволит эффективно использовать ресурсы предприятия, направляя их либо на поддержание устойчивости, структурной целостности, либо на увеличение гибкости, адаптивности.

**Ключевые слова:** система менеджмента качества, устойчивость, адаптивность, комплексные показатели устойчивости и адаптивности, закономерность целостности

© Антипов Д.В., Губанова О.Г., 2025

#### Для цитирования

Антипов Д.В., Губанова О.Г. Оценка устойчивости и адаптивности системы менеджмента качества с позиции закономерности целостности (эмерджентности) // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 140-147. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-140-147>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



# EVALUATION OF THE SUSTAINABILITY AND ADAPTABILITY OF THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM FROM THE PERSPECTIVE OF INTEGRITY (EMERGENCY)

Antipov D.V., Gubanova O.G.

Samara National Research University, Samara, Russia

**Abstract. Relevance.** In the current conditions of constant changes at various levels, as well as increasing complexity of technologies and public structures, along with efficiency and effectiveness acquire special value such properties of quality management system (QMS), as resilience and adaptability. Enterprises and QMS as a part of it need to be resilient to external and internal changes in order to maintain their integrity and function sustainably. At the same time, new opportunities, growth and development require adaptability and flexibility. Therefore, a timely assessment of the resilience and adaptability of the system is necessary to achieve long-term results for the enterprise. **Objectives.** Definition of the methodology for the quantitative evaluation of the state of QMS with the position of stability and adaptability on the basis of the integrity pattern (emmergency) of the general theory of systems. **Methods Applied.** The article uses methods of systems analysis and general theory of systems, in particular, investigated the pattern of integrity (emergency) applied to the quality management system. For the calculation of integrated indicators of resilience and adaptability, a methodology of quallometry – an integrated assessment of the indicators of the populations of properties is used. **Originality.** Analysis of QMS based on the principles and regularities of general systems theory. Complex indicators of system resilience and adaptability were determined. **Results.** Using the proposed methodology, the adaptation and sustainability indicators of an existing automotive company producing lead-acid starter batteries for the period 2019-2023 were calculated. Based on the calculated data, a graphical image of the dynamics of indicators was constructed. The analysis of the results obtained was carried out, and compliance with the systemic integrity pattern (emergency) was identified. **Practical Relevance.** Timely assessment of QMS with integrated indicators of resilience and adaptability will allow to use effectively the resources of the enterprise, directing them either to maintaining resilience, structural integrity or to increase flexibility, adaptability.

**Keywords:** quality management system, sustainability, adaptability, integrated indicators of sustainability and adaptability, integrity pattern

## For citation

Antipov D.V., Gubanova O.G. Evaluation of the Sustainability and Adaptability of the Quality Management System from the Perspective of Integrity (Emergency). *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 140-147. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-140-147>

## Введение

Любое явление в мире, предмет или процесс может рассматриваться как система. При этом как система может исследоваться Вселенная или живая клетка, общество в целом или научный коллектив, промышленное предприятие или система обеспечения качества продукции. Термин «система» используется в том случае, когда необходимо охарактеризовать исследуемый объект как нечто целое, сложное, состоящее из неделимых частей, связанных друг с другом. Родоначальник теории систем Л. фон Берталанфи рассматривает систему как «комплекс взаимодействующих компонентов» [1]. Существует несколько десятков определений понятия «система». Крупный специалист по философии и методологии науки В. Н. Садовский исследовал около сорока определений, получивших наибольшее распространение в литературе. Проведенный анализ выявил три группы определений, у которых есть общие признаки системы: элементы, связи, отношения и целостность. «На этой основе мы приходим к выводу, что выделенная струк-

тура определения понятия «система» выступает как базовая, характеризующая, во всяком случае, весьма большой класс систем. Внесение в эту структуру дополнительных признаков ... приводит к конкретизации базового определения и, по-видимому, задает определенные классы систем» [2]. Системный подход к управлению качеством связывает науку об управлении качеством с теоретическими исследованиями в области общей теории систем, кибернетики и синергетики. Все общие принципы теории систем в полной мере относятся и к системе менеджмента качества.

Актуальность применения системных закономерностей для оценки состояния (СМК) диктуется тенденциями современного мира. В условиях постоянных изменений и возрастающей требовательности заинтересованных сторон наравне с результативностью и эффективностью приобретают особую ценность такие свойства систем, как устойчивость и адаптивность. Организациям необходимо быть адаптивными, гибкими, чтобы отвечать потребностям рынка, обладать способностью к быстрому принятию решений.

К теме устойчивости и адаптивности организаций обращались многие отечественные и зарубежные авторы, разработаны и действуют соответствующие стандарты. Например, стандарт ISO 22316:2017 определяет устойчивость как способность организации адаптироваться к изменяющимся условиям, чтобы достигать своих целей и процветать. Более устойчивые организации могут предвидеть и реагировать на угрозы и возможности, возникающие в результате внезапных или постепенных изменений в их внутреннем и внешнем контексте [3]. В стандарте устанавливаются принципы и атрибуты организационной устойчивости организации, обеспечивающие основу стратегии для достижения устойчивости.

Авторами Т.С. Сухатской и Е.В. Трошковой предлагается оценить организационную устойчивость путем анализа наличия/отсутствия организационных патологий или степени их проявления [4]. Под термином «организационная патология» понимается сбой в выполнении какой-либо функции, или устойчивое недостижение целей организации, или достижение целей, но с существенно большими затратами времени, сил и средств по сравнению с запланированным уровнем. Авторами проанализированы модели управления социально-экономическими системами на предмет возможного наличия организационных патологий и намечены способы повышения организационной устойчивости.

Большинство организаций реагируют на происходящие изменения, используя реактивный подход (принятие решений после события). С другой стороны, ведущие организации разрабатывают планы и процедуры для смягчения последствий непредвиденных событий проактивным способом (предварительное принятие решений). При таком подходе одним из действий является установление и отслеживание ключевых показателей эффективности (KPI). Для изучения влияния нефинансовых KPI на организационную устойчивость проведено эмпирическое исследование на двух предприятиях из металломеханического сектора Бразилии, где данные были собраны посредством интервью, посещений мест и вторичных документов [5]. В результате исследования оказалось, что мониторинг нефинансовых KPI может быть одним из способов раннего выявления влияния разрушительных событий на организацию и поможет принять своевременные меры для смягчения или минимизации последствий. Таким образом, установление и управление нефинансовыми KPI поможет организациям справиться с неопределенностью и стать устойчивыми.

Острая конкуренция, нехватка ресурсов, более информированные и требовательные потребители, прогрессивные технологические достижения, изменение климата и требования заинтересованных сторон ставят новые вызовы перед организациями. Для достижения экономических, экологических и социальных результатов организациям необходимо интегрировать устойчивое развитие на различных уровнях управления. Среди широкого спектра инструментов для достижения этих целей SMK была определена как путь к интеграции принципов устойчивого развития [6]. Важно отметить,

что это возможно в новой парадигме качества – парадигме эмерджентности, в которой лидерство имеет решающее значение, указывая направления, которые вдохновляют на изменения во всей организации, вовлекают всех сотрудников в устойчивое развитие. Интеграция принципов устойчивого развития в SMK может помочь развитию этой новой парадигмы, поскольку она открыта для изменений, ориентирована на удовлетворение потребностей заинтересованных сторон, а также использует системный подход к достижению долгосрочных результатов. Устойчивость может быть достигнута за счет более скоординированных процессов управления и внедрения SMK для удовлетворения потребностей и ожиданий заинтересованных сторон.

Авторами предложены различные подходы к оценке устойчивости SMK и организации в целом, однако все они имеют качественный характер, а исследований, предлагающих количественную оценку устойчивости SMK, все ещё недостаточно.

Целью настоящего исследования является определение методики количественной оценки состояния SMK с позиции устойчивости и адаптивности на основе закономерности целостности (эмерджентности) общей теории систем.

### Теория, материалы и методы исследования

В системе менеджмента качества присутствуют технико-экономические и социальные аспекты управления, поэтому её можно отнести к категории сложных, открытых систем. Понятие «открытая система» введено Л. фон Берталанфи [7]. Отличительные черты открытых систем – способность обмениваться с внешней средой массой, энергией, информацией. Такие системы обладают свойствами самоорганизации, то есть способностью выходить на новый уровень развития, адаптироваться к изменяющимся внешним и внутренним условиям и сохранять при этом определенную устойчивость.

Рассмотрим на примере системы менеджмента качества (SMK) предприятия автомобилестроения проявление некоторых принципов и закономерностей общей теории систем.

#### 1. Структура SMK.

Элементами и в то же время подсистемами SMK являются процессы, которые составляют её процессную модель. На **рис. 1** представлена типовая процессная модель предприятия автомобилестроения.

Между основными и вспомогательными процессами существуют связи по типу входа-выхода и обратной связи с управляющими процессами. Эти связи характеризуются направлением (от процесса к процессу). Структура системы является структурой иерархического типа с вертикальными и горизонтальными связями. Процессы, составляющие процессную модель SMK (см. **рис. 1**), связаны между собой общими правилами взаимодействия на основе стандартов ISO 9000, инженерных методик APQP, FMEA, SPC, MSA и др.

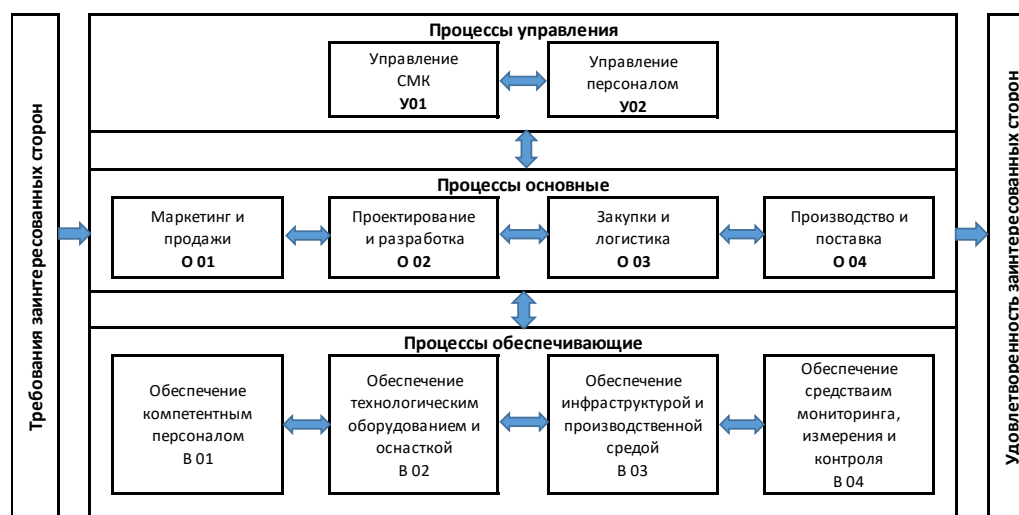


Рис.1. Типовая процессная модель предприятия автомобилестроения: Y – управляющие процессы; O – основные процессы; B – вспомогательные процессы

Fig. 1. Typical process model of an automotive manufacturing enterprise: Y – control processes; O – basic processes; B – auxiliary processes

## 2. Классификация СМК как системы.

Существуют различные принципы классификации систем. Выбор принципов зависит от решаемой задачи исследования. Одной из наиболее значимой для социально-экономических систем, таких как СМК, является классификация по степени организованности.

СМК является самоорганизующейся системой, так как обладает рядом признаков, характерных для развивающихся систем (табл. 1).

Одной из закономерностей, объясняющей особенности таких систем, является закономерность целостности (эмерджентности) – появление у системы новых свойств, качеств, отсутствующих у элементов.

Для понимания данной закономерности обратимся к истории возникновения индустриального качества. На этапе организации производства в виде мастерских качество продукции определялось мастером. Часть работы выполнялась учениками, но на выходе контролировалась и собиралась мастером. Качество при этом не делилось на части, было целостным. Массовое производ-

ство в эпоху индустриализации потребовало разделения единого потока производства на части, что повлекло за собой определение качества для каждой операции. Не только определение требования, но и обеспечение сборки частей в готовый продукт.

На каждом уровне сборки частей появлялись проблемы «несобираемости», которые решались введением допусков, стандартизацией, статистическими методами контроля, новыми организационными формами управления. При этом неизбежно возникали потери качества. «Таким образом, видно, что проблема сложности объекта (продукции, процессов ее создания, организационных структур, взаимодействий) преодолевалась через разделение его на части (детали, процессы, функции, подсистемы и системы), их создание и последующую «сборку», что приводило и, как правило, приводит к потерям ценности, качества, денег и времени. Устранение этих потерь до сих пор является центральной задачей бизнеса, экономик, которую и следует считать главной задачей теории и практики качества» [8].

Таблица 1. Признаки самоорганизующихся систем

Table 1. Signs of self-organizing systems

Признаки самоорганизующихся систем	Проявление признаков в СМК
Нестационарность параметров и стохастичность поведения	Показатели процессов как параметры системы изменяются при годовом планировании, а также могут изменяться под влиянием внешних и внутренних факторов, касающихся контекста предприятия
Уникальность и непредсказуемость поведения системы в конкретных условиях	При изменении внешних условий (например, требований потребителей, геополитической ситуации) или внутренних условий (изменение структуры, смена ключевых специалистов) система ведет себя особым, нестандартным образом
Способность адаптироваться к изменяющимся условиям среды и помехам (внутренним и внешним)	Разработка планов действий в нештатных ситуациях, планов корректирующих действий, стратегических планов развития
Способность вырабатывать варианты поведения	Анализ рисков процессов позволяет принимать решения по минимизации рисков и использованию возможностей улучшения
Способность изменять свою структуру, сохраняя при этом целостность и основные свойства	Изменение внутренней структуры процесса, процессной модели СМК
Способность и стремление к целеобразованию	Разработка целей в области качества, их каскадирование до каждого процесса

3. Достижение баланса СМК между состояниями целостности и аддитивности.

СМК как развивающаяся система находится между состоянием абсолютной целостности (жесткая структура, высокая управляемость процессов) и состоянием абсолютной аддитивности (независимость процессов системы). Без обеспечения целостности невозможно сохранить структуру, взаимосвязь элементов, устойчивость системы. В случае увеличения акцента на жесткую структуру, иерархию в системе будут подавляться полезные свойства элементов, но увеличиваться устойчивость, управляемость системы. В то же время при увеличении «свободы» элементов система будет более гибкая, адаптивная, но могут возникнуть противоречия и конфликты между элементами. Система должна держать баланс между состоянием устойчивости, целостности и состоянием аддитивности, свободы элементов.

Особенность самоорганизующихся систем – наличие активных элементов. За счет них проявляются такие свойства, как нестационарность (изменчивость), уникальность и непредсказуемость поведения, способность адаптироваться в изменяющихся условиях, принципиальная неравновесность и др. В СМК только человек, как активный элемент системы, может придать ей такого рода свойства. От человека зависит устойчивость системы, её сбалансированность между порядком и свободой проявления и в конечном итоге само существование.

В последнее время наблюдается тенденция, в которой роль человека на производстве сводится к уровню механизма. Требования международных стандартов по качеству рекомендуют везде, где возможно, поставить устройства защиты от ошибок, создать такие условия работы, чтобы совсем исключить влияние «человеческого фактора». Но человек, особенно с русским менталитетом, считает себя «гуру» на своем рабочем месте и все выполняет по-своему. На наш взгляд, гораздо больше пользы для производства и в целом для экономики государства будет возродить стремление к творчеству, новаторству, как это было в нашей стране не так давно.

Обратимся к наследию советской эпохи. Вот фрагмент речи И.В. Сталина на выпуске академиков Красной Армии 04.05.1935 года: «Надо, наконец, понять, что из всех ценных капиталов, имеющихся в мире, самым ценным и самым решающим капиталом являются люди, кадры. Надо понять, что при наших нынешних условиях “кадры решают все”. Будут у нас хорошие и многочисленные кадры в промышленности, в сельском хозяйстве, на транспорте, в армии, наша страна будет непобедима. Не будет у нас таких кадров – будем хромать на обе ноги» [9]. Несколько слов об условиях, в которых была наша страна в то время: санкции и эмбарго со стороны крупных экономик мира (США, Германия, Франция, Англия), внешний долг, превышающий запасы Центробанка, отсутствие компетенции и технологии в ряде отраслей экономики, страна находится на пороге войны. Можно провести параллели с ситуацией, сложившейся в настоящее время. И, несмотря на такие сложные

условия, экономика страны в период 1929–1955 годов выросла в 14 раз, а среднегодовой рост, за вычетом четырех военных лет, составлял 13,8%. В XX веке это самый большой в мире рост национальной экономики на протяжении более чем 20 лет [10].

За счет чего случился такой феноменальный рост? Ответ на этот вопрос дают авторы книги «Кристалл роста», проделав глубокий анализ, обращаясь к первоисточникам, в том числе и засекреченным ранее. Не умаляя все прочие важные решения, отметим главное – это удивительная сплоченность всех граждан страны вокруг национальной идеи. А что есть национальная идея? Она, как образ будущего, собирает вокруг себя нацию для решения больших целей. Она вмещает в себя ценности, идеалы, стремления народов к обретению гармонии и благополучия. Всем известная «американская мечта» была провозглашена в 1931 году, в самый пик Великой депрессии. И с тех пор она «красной нитью» проходит через всю жизнь американцев, без нее не обходится ни одна предвыборная кампания, она также вдохновляет народы других стран. После развала СССР последние три десятилетия в России все ещё ищут национальную идею. Хотя достаточно вспомнить свою историю, посмотреть вглубь себя и ответить на вопрос: «С чего начинается Родина?». Родина – это не столько историческая территория, сколько тот духовный стержень, «русский дух», что объединяет народ в моменты испытаний. Это тот самый «русский мир», включающий в себя духовные и морально-нравственные ценности, без которых России не станет. Об этом говорил президент страны В.В. Путин во время Парада 9 мая 2024 года: «... нет ничего крепче, мощнее и надежнее нашего единства. Нет в мире ничего сильнее нашей любви к Родине».

Казалось бы, национальная идея – это далекая тема от производства. Но здесь действует принцип фрактальности, то есть самоподобия. Когда задается общий целостный принцип, то этот принцип повторяется во всех частях целого. Что же в системе управления качеством может быть объединяющим всех работников? На наш взгляд, это политика в области качества. На сегодняшний день роль этого документа не оценена в полной мере. В соответствии со стандартом ИСО Р 9001-2015 п. 5 «Лидерство» политика в области качества должна согласовываться с условиями среды организации и её стратегическим направлением [11].

Также политика является основой для формирования целей в области качества. Стандарт дает свободу в выборе стратегического направления развития организации. И зачастую собственники выбирают только увеличение прибыли, дохода. О значении прибыли рассуждает выдающийся менеджер XX века Г. Форд: «Прибыль принадлежит самому предприятию и обеспечивает ему возможность оказывать обществу услуги и продолжать свой естественный рост» [12]. Предприятие как целое объединяет работников как части целого за счет сложения векторов целей и интересов. Каждого человека можно рассматривать с трех плоскостей: прошлое, настоящее, будущее. В подавляющем большинстве случаев внимание человека направлено в прошлое. То, что прошло, понятно, на него можно опереться. А будущее неопределенно,



туманно, зависит от сложения многих факторов, которые просчитать способны немногие. Настоящее просто неумовно, как миг. На руководство организации, ее лидеров ложится обязанность просчитывать будущее, ставить стратегические цели, писать долгосрочные планы. Тем самым складывать вектора внимания всех сотрудников к достижению целей предприятия. И, если в этой общей цели каждый работник не увидит свою личную цель, то предприятие не дойдет до намеченной цели в срок. Сложится ситуация, как в известной басне И.А. Крылова «Лебедь, рак и щука».

Организирующую роль оказала бы общегосударственная политика в области качества, на которую могли бы равняться предприятия. На данный момент в России нет утвержденной национальной политики, хотя ее разработка велась Госстандартом России совместно с группой министерств и ведомств, с участием научно-исследовательских и академических институтов ещё с начала 2000 года. В то время была принята точка зрения на идеологию качества как национальную идею, поскольку для экономического и социального прогресса страны необходимо достижение и поддержание качества широчайшего спектра предметов, процессов, явлений материального и духовного мира нашего общества [13]. Будем надеяться, что вслед за «Концепцией технологического развития до 2030 года» будет принята Концепция развития качества в России.

### Результаты исследования и их обсуждение

Количественная оценка устойчивости и адаптивности СМК. Свойство целостности связано с целью, для выполнения которой создается система [14]. Поэтому для определения численного показателя целостности или устойчивости системы используем параметры, которые характеризуют систему как целое:

- цели в области качества;
- объём выпущенной продукции;
- доля рынка.

Показатель адаптивности системы связан с проявлением процессов и активных элементов в них (человека). Для количественной оценки адаптивности используем следующие показатели:

- результативность процессов СМК;
- эффективность процессов СМК;
- количество предложений по улучшению.

Самоорганизующиеся системы, к которым принадлежит СМК, являются наименее изученными объектами в общей теории систем, с большой степенью неопределенности. Поэтому выбранные показатели

не являются итоговыми, у каждого предприятия они могут дополняться и изменяться.

Для определения комплексных показателей устойчивости и адаптивности используем одну из методологий квалиметрии - комплексную оценку показателей совокупностей свойств. Данный метод подробно нами рассматривался здесь [15].

Комплексный показатель  $P$  находим как средневзвешенное арифметическое по формуле

$$P = \sum_{i=1}^n k_i = \sum_{i=1}^n a_i p_i = a_1 p_1 + a_2 p_2 + \dots + a_n p_n, \quad (1)$$

где  $a_i$  – коэффициент весомости  $i$ -го параметра;  $p_i$  – безразмерная величина  $i$ -го параметра;  $n$  – количество учитываемых параметров.

В качестве примера рассмотрим расчет показателей адаптивности и устойчивости действующего предприятия автомобилестроения, выпускающего свинцово-кислотные стартерные аккумуляторы. Данные для определения показателя устойчивости  $P_u$  и адаптивности  $P_a$  приведены в табл. 2, 3.

Аналогично определены показатели устойчивости и адаптивности за период 2019-2023 годов (табл. 4).

Графическое изображение динамики показателей представлено на рис. 2.

На графике видно, что динамика показателей устойчивости и адаптивности идет в противофазе. Рост устойчивости предполагает снижение адаптивности, что соответствует системной закономерности целостности (эмерджентности).

Важно отметить, что в период 2020–2022 годов предприятие столкнулось с многочисленными трудностями, которые были у всей отрасли в связи с пандемией, санкциями и сложной геополитической обстановкой. В это время показатель адаптивности снизился, а изменения показателя устойчивости незначительны. По поведению показателей можно говорить о запасае устойчивости предприятия, его структура выдержала влияние изменений. Баланс между целостностью и аддитивностью был смещен в сторону целостности, что положительно сказалось на деятельности предприятия. Начиная с 2023 года, возрастает роль адаптивности, так как возникают новые вызовы перед экономикой страны – недостаток квалифицированных кадров. Для решения кадрового вопроса необходимо сместить акцент на адаптивность системы, так как это напрямую связано с влиянием человека как активного элемента системы.

Таблица 2. Данные для расчета показателя устойчивости  $P_u$  за 2023 год

Table 2. Data for the calculation of the 2023 resistance index  $P_u$

Измеряемый параметр	Относительная единица измерения	Значение параметра, относ. ед. изм. $p$	Важность $A_i$ , баллов из 5	Коэффициент весомости $a_i$	$a_i \cdot p_i$
Целевые показатели в области качества	Процент достижения	0,72	4	0,20	0,14
Объем продукции	Процент выполнения плана	1,06	5	0,25	0,27
Доля рынка OEM	Процент	1,22	5	0,25	0,31
Доля рынка AEM	Процент	0,93	3	0,15	0,14
Сумма:			20	1	0,85

Таблица 3. Данные для расчета показателя устойчивости  $P_a$  за 2023 годTable 3. Data for the calculation of the 2023  $P_a$  stability indicator

Измеряемый параметр	Относительная единица измерения	Значение параметра, относ. ед. изм. $p$	Важность $A_i$ , баллов из 5	Коэффициент весомости $a_i$	$a_i \cdot p_i$
Результативность процессов СМК	Процент достижения	0,8	5	0,38	0,31
Эффективность процессов СМК	Процент достижения	1	5	0,38	0,38
Количество предложений по улучшению	Процент выполнения плана	2,64	3	0,23	0,61
Сумма:			13	1	1,3

Таблица 4. Показатели устойчивости и адаптивности в период 2019-2023 годов

Table 4. Indicators of sustainability and adaptability in the period 2019-2023

Показатель	2019	2020	2021	2022	2023
Устойчивость $P_u$	0,82	0,84	0,96	0,93	0,85
Адаптивность $P_a$	1,04	0,7	0,65	0,85	1,3

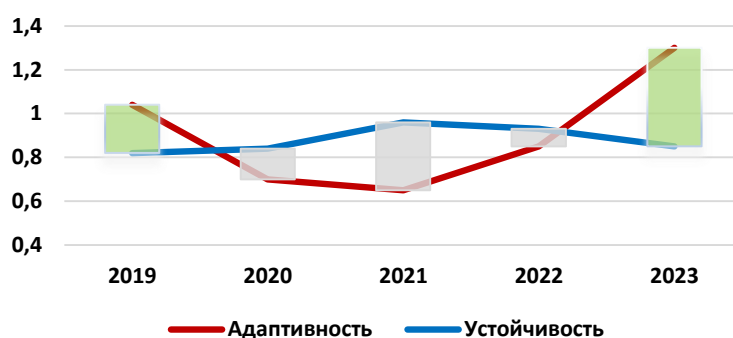


Рис. 2. Динамика показателей устойчивости и адаптивности

Fig. 2. Dynamics of sustainability and adaptability

### Заключение

Глубина проблем, с которыми сталкиваются предприятия в настоящее время, касаются всех уровней общества, так как предприятие есть подсистема в большой системе экономики страны. И решение этих проблем требует системного подхода на каждом уровне: страны, отрасли, предприятия. Остаётся открытым вопрос объединения интересов каждой категории для решения задач как отдельного предприятия как части целого в общей экономической системе, так и всего государства.

В данной статье мы изменили фокус оценки системы через принципы и закономерности общей теории систем, не используя общепринятую оценку через результативность и эффективность СМК. Таким образом, получили возможность оценки работы системы с позиции баланса устойчивости и адаптивности, что актуально в современных условиях повышения сложности технологий, общественного устройства, взаимоотношений государств и одновременного ускорения темпов изменений. Выдержать этот баланс поможет своевременная оценка СМК с помощью комплексных показателей устойчивости и адаптивности. Мониторинг динамики показателей даст возможность вовремя сменить акцент внимания, более эффективно использовать ресурсы компании для достижения поставленных целей.

### Список источников

- Берталанфи Л. фон. Общая теория систем: критический обзор // Исследования по общей теории систем. М.: Прогресс, 1969. 520 с.
- Садовский В.Н. Некоторые принципиальные проблемы построения общей теории систем // Системные исследования. М.: Наука, 1971. 280 с.
- ISO 22316:2017. Безопасность и устойчивость к негативным внешним воздействиям. Устойчивость организации. Принципы и качественные признаки. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс». <https://www.iso.org/ru/standard/50053.html>
- Сухатская Т.С., Трошкова Е.В. Повышение организационной устойчивости системы менеджмента качества организации // Проблемы сертификации, управления качеством и документационного обеспечения управления: материалы всерос. науч.-практ. конф. Красноярск: Изд-во Сибирского гос. ун-та науки и технол. им. М.Ф. Решетнева, 2022. С. 105-109.
- Maria Júlia Eyng Werner, Ana Paula Louise Yamada, Enzo Gabriel Nascimento Domingos, Luciana Rosa Leite & Carla Roberta Pereira // Exploring Organizational Resilience Through Key Performance Indicators, Journal of Industrial and Production Engineering. 2021, vol. 38:1, pp. 51-65. DOI: 10.1080/21681015.2020.1839582
- Silva C.S., Magano J. Matos, Nogueira A., Sustainable T. Quality Management Systems in the Current Paradigm: The

- Role of Leadership // Sustainability. 2021, vol. 13, 2056. <https://doi.org/10.3390/su13042056>.
7. Берталанфи Л. фон. История и статус общей теории систем // Системные исследования. М.: Наука, 1973. 269 с.
  8. Лapidus В.А., Касторская Л.В. Качество и экспоненциальный век // Стандарты и качество. 2020. № 10. С. 78-83.
  9. Сталин И.В. Сочинения. Т. 14. М.: Писатель, 1997. 364 с.
  10. Галушка А.С., Ниязметов А.К., Окулов М.О. Кристалл роста. К русскому экономическому чуду. М.: Наше завтра, 2021. 330 с.
  11. ГОСТ Р ИСО 9001:2015. Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандартинформ, 2020. 32 с.
  12. Генри Форд. Моя жизнь. Мои достижения. М.: Изд-во АСТ, 2020. 349 с.
  13. Белобрагин В.Я. Качество. Введение в науку об управлении качеством. М., 2013. 349 с.
  14. Теория систем и системный анализ в управлении организациями: Справочник: учеб. пособие/под ред. В.Н. Волковой и А.А. Емельянова. М.: ИНФРА, 2012. 848 с.
  15. Антипов Д.В., Губанова О.Г. Подходы к оценке системы менеджмента качества со стороны высшего руководства с позиции адаптивности и устойчивости // Качество. Инновации. Образование. 2021. № 4(174). С. 11-19. DOI: 10.31145/1999-513x-2021-4-11-19
- References**
1. Bertalanfi L. fon. *Obshchaya teoriya sistem: kriticheskii obzor. Issledovaniya po obshchei teorii sistem* [General systems theory: critical review. Research on the general theory of systems]. Moscow: Progress, 1969, 520 p. (In Russ.)
  2. Sadovskii V.N. *Nekotorye printsipial'nye problemy postroeniya obshchei teorii sistem. Sistemnye issledovaniya* [Some fundamental problems of general systems theory. System studies]. Moscow: Nauka, 1971. 280 p. (In Russ.)
  3. ISO 22316-2017 Security and resilience - Organizational resilience - Principles and attributes. <https://www.iso.org/ru/standard/50053.html>
  4. Sukhatskaya T.S., Troshkova E.V. Povyshenie organizatsionnoi ustoychivosti sistemy menedzhmenta kachestva organizatsii. *Problemy sertifikatsii, upravleniya kachestvom i dokumentatsionnogo obespecheniya upravleniya: materialy vseros. nauch.-prakt. konferentsii* [Problems of certification, quality management and documentation management. Proceedings of the Russian Scientific Conference]. Krasnoyarsk: Publishing House of Reshetnev Krasnoyarsk State University, 2022, pp. 105-109. (In Russ.)
  5. Maria Júlia Eynng Werner, Ana Paula Louise Yamada, Enzo Gabriel Nascimento Domingos, Luciana Rosa Leite & Carla Roberta Pereira. Exploring Organizational Resilience Through Key Performance Indicators, *Journal of Industrial and Production Engineering*. 2021;1(38):51-65. DOI: 10.1080/21681015.2020.1839582
  6. Silva, C.S., Magano, J. Matos, A. Nogueira, T. Sustainable Quality Management Systems in the Current Paradigm: The Role of Leadership. *Sustainability*. 2021; 13(2056). <https://doi.org/10.3390/su13042056>
  7. Bertalanfi L. fon. *Istoriya i status obshchei teorii sistem /L. fon Bertalanfi. Sistemnye issledovaniya: Ezhegodnik* [History and status of general systems theory. System Studies: Yearbook]. Moscow: Nauka, 1973. 269 p. (In Russ.)
  8. Lapidus V.A., Kastorskaya L.V. Kachestvo i eksponentsial'nyi vek *Standarty i kachestvo* [Standards and quality], 2020; (10): 78-83. (In Russ.)
  9. Stalin I.V. *Sochineniya T. 14* [Essays volume 14]. Moscow: Pisatel, 1997, 364 p. (In Russ.)
  10. Galushka A.S., Niyazmetov A.K., Okulov M.O. Kristall rosta. *K russkomu ekonomicheskomu chudu* [Growth Crystal. To the Russian economic miracle]. Moscow: Nashe zavtra, 2021. 330 p. (In Russ.)
  11. Stat standart GOST R ISO 9001:2015. Sistemy menedzhmenta kachestva. Trebovaniya. Moscow: Standarts Publishing House, 2020, 32 p. (In Russ.)
  12. Genri Ford. *Moya zhizn'. Moi dostizheniya* [My life. My achievements] Moscow: Publishing House AST, 2020. 349 p. (In Russ.)
  13. Belobragin V.Ya. Kachestvo. *Vvedenie v nauku ob upravlenii kachestvom* [Quality. Introduction to the science of quality management] Moscow: 2013, 349 p. (In Russ.)
  14. Volkovoi V.N. Emel'yanova A.A. *Teoriya sistem i sistemnyi analiz v upravlenii organizatsiyami: Spravochnik: ucheb. posobie* [Systems theory and system analysis in organization management] Moscow: INFRA, 2012, 848 p. (In Russ.)
  15. Antipov D.V., Gubanova O.G. Podkhody k otsenke sistemy menedzhmenta kachestva so storony vysshego rukovodstva s pozitsii adaptivnosti i ustoychivosti. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie* [Quality. Innovation. Education], 2021; (174): 11-19. DOI: 10.31145/1999-513x-2021-4-11-19

Поступила 09.01.2025; принята к публикации 26.03.2025; опубликована 30.06.2025

Submitted 09/01/2025; revised 26/03/2025; published 30/06/2025

**Антипов Дмитрий Вячеславович** – доктор технических наук, профессор кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия. Email: antipov.dv@ssau.ru

**Губанова Ольга Геннадьевна** – аспирант, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия. Email: 2021-00228@students.ssau.ru

**Dmitry V. Antipov** – DrSc (Eng.), Professor, Samara National Research University, Samara, Russia. Email: antipov.dv@ssau.ru

**Olga G. Gubanova** – Postgraduate Student, Samara National Research University, Samara, Russia. Email: 2021-00228@students.ssau.ru

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 658  
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-148-157



## МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА МАМДАНИ В СРЕДЕ MATLAB

Дыбулина Н.С.<sup>1</sup>, Царева С.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия

<sup>2</sup>Ярославский государственный медицинский университет, Ярославль, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** В настоящее время разработано и адаптировано множество методов и подходов к оценке результативности процессов системы менеджмента качества (СМК). В большинстве случаев организации прибегают к использованию классических методик оценки результативности СМК и ее процессов, основанных на определении критериев и степеней их достижения. Однако такие подходы не позволяют учитывать влияние возникающих неопределенностей и рисков на результативность процессов и функционирование СМК в целом. В связи с этим весьма актуальной становится парадигма нечеткого алгоритма Мамдани, позволяющего создать предпосылки оценки показателей результативности процессов СМК и управления критериальными параметрическими настройками этих процессов. **Цель работы и методы исследования.** В статье рассматривается разработка модели оценки результативности процессов СМК с учетом влияния остаточного риска по процессам на основе нечеткого алгоритма Мамдани. Реализация методов математического моделирования выполнена с использованием пакета Fuzzy Logic Designer в программной среде MATLAB. **Новизна.** Предложенная модель реализует новый подход к оценке процессов системы, обеспечивающий комплексный анализ результативности процессов СМК в условиях неопределенности. Схема нечеткой модели оценки результативности процессов включает в себя «2 входа – 1 выход, 25 правил» и позволяет учитывать количественные и качественные аспекты, определяющие результативность процессов СМК, такие как внешние и внутренние факторы, ранги рисков. **Результаты.** В ходе работы разработана нечеткая модель оценки результативности процессов СМК с учетом влияния остаточного риска процесса. **Практическая значимость.** Использование нечетких моделей, в рамках которых анализируются результаты функционирования процессов СМК, позволяет учитывать значительное влияние внутренних и внешних факторов, рисков, а также разрабатывать и вносить комплексные изменения, обеспечивающие непрерывное улучшение деятельности компании.

**Ключевые слова:** процессы СМК, показатели результативности, нечеткая логика, алгоритм Мамдани

© Дыбулина Н.С., Царева С.А., 2025

### Для цитирования

Дыбулина Н.С., Царева С.А. Модель оценки результативности процессов системы менеджмента качества на основе применения алгоритма Мамдани в среде MATLAB // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 148-157. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-148-157>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



# MODEL FOR ASSESSING OF THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM PROCESSES PERFORMANCE BASED ON THE APPLICATION OF THE MAMDANI ALGORITHM IN MATLAB ENVIRONMENT

Dybulina N.S.<sup>1</sup>, Tsareva S.A.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

<sup>2</sup>Yaroslavl State Medical University, Yaroslavl, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** Currently, many methods and approaches to assessing the effectiveness of quality management system (QMS) processes have been developed and adapted. In most cases, organizations resort to using classical methods for assessing the effectiveness of the QMS and its processes, based on defining criteria and degrees of their achievement. However, such approaches do not allow taking into account the impact of emerging uncertainties and risks on the effectiveness of processes and the functioning of the QMS as a whole. In this regard, the paradigm of the Mamdani fuzzy algorithm becomes very relevant, allowing to create prerequisites for assessing the performance indicators of QMS processes and managing the criterial parametric settings of these processes. **Objective and Methods Applied.** The article considers the development of a model for assessing the effectiveness of QMS processes taking into account the influence of residual risk in processes based on the Mamdani fuzzy algorithm. The implementation of mathematical modeling methods is performed using the Fuzzy Logic Designer package of the MATLAB software package. **Originality.** The proposed model implements a new approach to assessing system processes, providing a comprehensive analysis of the effectiveness of activities under uncertainty. A fuzzy model for assessing the effectiveness of a process, including “2 inputs - 1 output, 25 rules”, allowing to take into account quantitative and qualitative aspects that determine the effectiveness of QMS processes, such as external and internal factors, risk ranks. **Results.** In the course of the work, a fuzzy model for assessing the effectiveness of QMS processes was developed taking into account the influence of the residual risk of the process. **Practical Relevance.** The use of fuzzy models, within which the results of the functioning of QMS processes are analyzed, allows to take into account the significant influence of internal and external factors, risks, as well as to develop and introduce complex changes that ensure continuous improvement of the company's activities.

**Keywords:** QMS processes, effectiveness indicators, fuzzy logic, Mamdani algorithm

## For citation

Dybulina N.S., Tsareva S.A. Model for Assessing of the Quality Management System Processes Performance Based on the Application of the Mamdani Algorithm in Matlab Environment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 148-157. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-148-157>

## Введение

Быстро изменяющиеся условия рынка, социально-политические тенденции и состояние экономики являются неоспоримыми факторами, оказывающими значительное влияние на деятельность организаций любых форм и масштабов. Достижение целей и эффективности бизнеса в условиях быстро изменяющихся внешних факторов среды обеспечивается построением гибких систем менеджмента, основанных на управлении изменениями и риск-ориентированном подходе, а управление рисками на разных уровнях менеджмента позволяет вырабатывать и принимать верные управленческие решения в условиях недостаточности и неоднозначности информации.

Принятие лучших мировых практик управления, формализованных в требованиях стандарта ISO 9001:2015, давно перестало быть модной тенденцией российского рынка и стало необходимой основой, обеспечивающей результативное функционирование компа-

ний. Применение процессного подхода, риск-ориентированного мышления и цикла PDCA, являющихся базисом любой системы менеджмента качества (СМК), способствует построению системы управления компанией как взаимосвязанной системы процессов, определению прозрачных метрик и критериев результативности процессов, а также позволяет быстро реагировать на внешние и внутренние вызовы посредством выстроенного механизма управления рисками.

Оценка результативности процессов СМК лежит в основе исследований значительного количества научных трудов российских и зарубежных ученых [1-3, 6-10], большинством из которых описываются «классические» методы оценки, основанные на применении балльных оценок достижения установленных критериев процессов, целей в области качества или данных внутренних аудитов. Подобные методики нашли широкое применение в практике управления качеством в большинстве российских компаний за счет понятного математического аппарата и простоты их применения.

Непрерывное развитие методологии менеджмента качества и применение новых подходов к оценке СМК находят отражение в авторских исследованиях, например в [4], в котором отмечается, что оценка эффективности системы менеджмента качества производственного предприятия должна реализовываться на основе подтверждения условий производства и таких аспектов, которые включают эффективность валидации, управления документированной информацией, управления производством, обеспечения качества и контроль качества, введенного в эксплуатацию производства и инспекции, выпуска и отзыва продукции и самоконтроля. При этом структурированная модель оценки эффективности системы менеджмента качества производственного предприятия основана на нечетком множестве интервальных колебаний.

В [5] отмечается, что разработка комплексного подхода к оценке эффективности СМК и анализу динамики системы, основанного на математическом моделировании и методах нечеткой логики, становится приоритетной задачей и приобретает все большее практическое значение для предприятий.

Однако рассмотренные выше подходы не позволяют учитывать влияние возникающих неопределенностей и рисков на результативность процессов и СМК в целом. В связи с этим весьма актуальной становится задача разработки методов оценки СМК, позволяющих получить комплексные результаты оценки и способствующих проведению наиболее углубленного анализа результатов деятельности компаний.

Целью работы является разработка модели оценки результативности процессов СМК с учетом влияния остаточного риска по процессам на основе нечеткого алгоритма Мамдани.

Несмотря на многочисленные исследования отечественных и зарубежных ученых в области оценки результативности СМК, до сих пор не было предложено модели оценки результативности СМК, учитывающей

влияние остаточных рисков процессов на достижение целевых значений критериев, а также базирующейся на аппарате нечеткой логики, что определяет научную новизну работы.

### Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования в настоящей работе было выбрано АО «МЕТАКЛЭЙ» – российский производитель инновационных полимерных композиций. Полимерные компаунды, производимые предприятием, применяются в трубной, кабельной, строительной отраслях промышленности. Продукция компании применяется для оболочки и изоляции кабельной жилы, материалов для антикоррозионной защиты металлических изделий и ремонта изоляции, огнезащитных материалов, добавок для производства строительных материалов и органофункциональных модификаторов для полимеров.

Продукция «МЕТАКЛЭЙ» аттестована в профильных отечественных институтах и имеет соответствующие подтверждающие документы. Система менеджмента качества компании сертифицирована на соответствие требованиям ISO 9001:2015 и СТО Газпром 9001-2018.

Дочерняя компания «МЕТАКЛЭЙ Исследования и Разработки» является резидентом инновационного центра «Сколково» и оборудована комплексом лабораторных машин и приборов, что обеспечивает комплексный подход к инжинирингу новых полимерных материалов, исследованиям свойств существующих образцов, выпуску опытных партий. Качество работ подтверждено аттестатом ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2019 [4].

Действующая в АО «МЕТАКЛЭЙ» методика оценки результативности процессов СМК также основывается на оценке достижения установленных значений критериев результативности процессов (табл. 1). Оценка результативности процесса делается на основе сравнения фактического и планового значений, 1 – процесс результативен, 0 – не результативен.

Таблица 1. Критерии результативности процессов СМК

Table 1. Criteria of the QMS processes effectiveness

Шифр процесса	Наименование процесса	Критерии результативности	План	Факт 2023 год	Результативность
У1	Анализ СМК со стороны руководства	Выполнение плана развития СМК на отчетный год	Не менее 0,8	1	1
О1	Планирование производственной деятельности	Механическая эффективность производственных линий	60-90%	45-96%	1
О2	Закупка сырья и материалов	ОПГ	Не менее 90	62	0
О3	Производство композитов	Количество претензий заказчика к готовой продукции (на 60 тыс. т)	Не более 1	0	1
О4	Складирование и хранение	Количество случаев нарушения условий хранения на складе	0	0	1
О61	Управление персоналом	Текущая текучесть кадров	Не более 30%	13,90%	1
О62	Управление инфраструктурой	Механическая эффективность газопоршневых установок	Не менее 0,38	0,41	1
О65	Мониторинг и измерение сырья, материалов и готовой продукции	Количество претензий к сырью и материалам со стороны производства	0	3	0
В1	Маркетинговые исследования и продажи	Удовлетворенность потребителей	Не менее 83%	92,40%	1

Исходя из представленных данных по оценке результативности процессов АО «МЕТАКЛЭЙ», два из девяти процессов СМК компании по итогам 2023 года признаны нерезультативными.

Управление рисками в Обществе осуществляется на основе единых подходов и требований к системе управления рисками и внутреннего контроля ПАО «Газпром». Действующая в Обществе методика подразумевает проведение многофакторной оценки последствий реализации риска и вероятности наступления рисков событий на основе метода экспертных суждений с применением балльных шкал. Ранжирование рисков для выбора оптимальной стратегии реагирования и разработки соответствующих мероприятий осуществляется с применением Матрицы рисков (рис. 1). Ранг рассчитывается сложением баллов по показателям вероятности и ущерба.

Вероятность	Очень высокая	6	7	8	9	10
	Высокая	5	6	7	8	9
	Средняя	4	5	6	7	8
	Низкая	3	4	5	6	7
	Очень низкая	2	3	4	5	6
		Несущественные/ Пренебрежимый	Малосущественные/ Низкий	Существенные/ Средний	Значительные/ Высокий	Критически/ Очень высокий
Последствия/Ущерб						

Рис. 1. Матрица рисков АО «МЕТАКЛЭЙ»

Fig. 1. Risk matrix of METACLAY JSC

Также определен перечень рисков, влияющих на недостижение критериев результативности процес-

сов, и остаточное значение риска по итогам 2023 года (табл. 2).

Необходимо отметить, что в практике СМК повсеместно наблюдается ситуация, когда управление рисками процессов и непосредственное функционирование процессов, достижение их результативности осуществляются разрозненно. Однако происходящие структурные изменения в экономической среде РФ, необходимость быстро реагировать на смену траекторий развития рынков, рост энтропии и другие значимые внешние факторы являются основанием для изменения подхода к оценке результативности деятельности компаний и переходу к многокритериальным моделям, учитывающим влияние рисков и неопределенностей, что может быть реализовано посредством разработки и применения моделей, основанных на механизмах нечеткой логики.

В обобщенном виде построение системы, основанной на принципах нечеткой логики, включает в себя следующие элементы:

1. Задание лингвистической переменной, в которой переменная принимает значения слов или фраз. Также определяется как кортеж:  $\langle x, T, U \rangle$ ,  $x$  — наименование или название лингвистической переменной;  $T$  — базовое терм-множество лингвистической переменной или множество ее значений (термов), каждое из которых представляет собой наименование отдельной нечеткой переменной  $\alpha$ ;  $U$  — область определения (универсум) нечетких переменных, которые входят в определение лингвистической переменной [5].

2. Выбор функции принадлежности, обозначаемой через  $\mu(x)$  и выражающей степень принадлежности переменной к нечеткому множеству. Наиболее часто на практике применяются функции принадлежности, которые допускают аналитическое представление в виде простой математической функции, такие как треугольная, трапециевидная и Гауссова функции принадлежности.

Таблица 2. Остаточное значение рисков недостижения критерия результативности

Table 2. Residual value of the risks of not achieving the performance criterion

№ п/п	Критерий результативности	Риск	Вероятность	Ущерб	Ранг
1	Выполнение плана развития СМК на отчетный год	Мероприятия не выполнены частично или полностью	2	3	5
2	Механическая эффективность производственных линий	Нормативное значение не достигнуто	2	5	7
3	ОТIF	Нормативное значение не достигнуто	5	4	9
4	Количество претензий заказчика к готовой продукции (на 60 тыс. т)	Получено более одной претензии от потребителя	4	4	8
5	Количество случаев нарушения условий хранения на складе	Зафиксировано одно и более нарушений условий хранения на складе	3	2	6
6	Текучесть кадров	Нормативное значение превышено	4	2	6
7	Механическая эффективность газопоршневых установок	Нормативное значение не достигнуто	4	3	7
8	Количество претензий к СИМ со стороны производства	Зафиксировано одна и более претензий к СИМ со стороны производства	5	4	9
9	Удовлетворенность потребителей	Нормативное значение не достигнуто	2	3	5

3. Определение системы нечеткого вывода, предназначенной для преобразования значений входных переменных процесса управления в выходные переменные на основе использования нечетких правил продукции. Процесс вывода включает в себе ряд последовательных этапов (рис. 2).

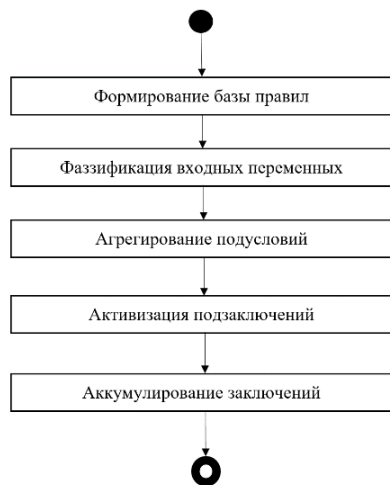


Рис. 2. Последовательность этапов нечеткого вывода  
Fig. 2. Sequence of fuzzy inference stages

Этапы нечеткого вывода могут быть реализованы различными способами, поскольку включают в себя наборы специфических отдельных параметров. Тем самым набор конкретных вариантов параметров каждого из этапов определяет алгоритм, в полном объеме реализующий нечеткий вывод в нечетких системах.

В работе продемонстрировано использование алгоритма нечеткого вывода Мамдани, для которого в общем случае база правил содержит правила вида

$$P_k : \text{если } < y_1 = A_{1k} > \text{ and } < y_2 = A_{2k} > \text{ and } \dots < y_{nk} = A_{nk} >, \\ \text{то } < z = B_k >. \quad (1)$$

Для упрощения изложения рассмотрим базу правил вида

P1: если  $x = A_1$  и  $y = B_1$ , то  $z = C_1$ ; P2: если  $x = A_2$  и  $y = B_2$ , то  $z = C_2$ .

По алгоритму Мамдани для текущих значений входных переменных  $x_1$  и  $y_1$  выполняется фаззификация, в результате которой определяется истинность отдельных условий в условной части правила. Затем производится их агрегирование и вычисляется результирующая истинность условной части правила. Поскольку в рассматриваемых правилах используется логическая связка «И», то для агрегирования используется операция  $\min$ .

$$\alpha_1 = \min(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{B_1}(y_1)), \alpha_2 = \min(\mu_{A_2}(x_1), \mu_{B_2}(y_1)). \quad (2)$$

Нечеткий вывод по каждому правилу, согласно алгоритму Мамдани, рассчитывается как

$$\mu_{r_1}(z) = \min(\alpha_1, \mu_{c_1}(z)), \mu_{r_2}(z) = \min(\alpha_2, \mu_{c_2}(z)). \quad (3)$$

Композиционный вывод формируется как объединение отдельных выводов:  $\mu = \max[\mu_{r_1}(z), \mu_{r_2}(z)]$  [6].

В соответствии с описанным выше механизмом построения нечеткой системы имеющиеся данные о результативности процессов системы менеджмента АО «МЕТАКЛЭЙ» были преобразованы. Оценка дополнительно проведена на основе соотношения фактического и планового значений и присвоения соответствующего балла на основе шкалы:

- менее 0,25 – 2 балла – «Очень низкая»;
- 0,25–0,5 – 4 балла – «Низкая»;
- 0,51–0,76 – 6 баллов – «Средняя»;
- 0,76–0,9 – 8 баллов – «Высокая»;
- 0,91–1 – 10 баллов – «Очень высокая».

В ходе переоценки результативности процессов получены данные (табл. 3).

Таблица 3. Переоценка результативности процессов  
Table 3. Reassessment of process effectiveness

Шифр процесса	Наименование процесса	Критерии результативности	Результативность, балл	Качественная характеристика
У1	Анализ СМК со стороны руководства	Выполнение плана развития СМК на отчетный год	10	Очень высокая
О1	Планирование производственной деятельности	Механическая эффективность производственных линий	10	Очень высокая
О2	Закупка сырья и материалов	ОТIF	6	Средняя
О3	Производство композитов	Количество претензий заказчика к готовой продукции (на 60 тыс. т)	10	Очень высокая
О4	Складирование и хранение	Количество случаев нарушения условий хранения на складе	10	Очень высокая
Об1	Управление персоналом	Текучесть кадров	10	Очень высокая
Об2	Управление инфраструктурой	Механическая эффективность газопоршневых установок	10	Очень высокая
Об5	Мониторинг и измерение сырья, материалов и готовой продукции	Количество претензий к сырью и материалам со стороны производства	4	Низкая
В1	Маркетинговые исследования и продажи	Удовлетворенность потребителей	10	Очень высокая



### Полученные результаты и их обсуждение

Для разработки нечеткой модели оценки результативности процессов СМК АО «МЕТАКЛЭЙ» с учетом влияния остаточного риска в работе был использован пакет прикладных программ MATLAB с пакетом расширения Fuzzy Logic Designer.

Лингвистическими характеристиками входной переменной «Результативность процесса» определены «Очень низкая», «Низкая», «Средняя», «Высокая» и «Очень высокая». Для входной переменной «Ранг риска»: «Пренебрежимый», «Малосущественный», «Существенный», «Значимый» и «Критический».

Терм-множество выходной лингвистической переменной «Результативность процесса с учетом риска» включает характеристики: «Очень низкая», «Низкая», «Средняя», «Высокая» и «Очень высокая».

Интервалы пересечения термов определены группой экспертов. Для выходной лингвистической переменной «Результативность процесса с учетом риска» интервалы пересечения термов приняты равными интервалам пересечения термов переменной «Результативность процесса». Оценка интервалов

пересечения термов лингвистической переменной «Ранг риска» проведена аналогичным образом.

На основе полученных экспертных данных сформированы терм-множества входных и выходной лингвистических переменных. В качестве функции принадлежности выбрана треугольная, представлены входные и выходное терм-множества нечеткой системы «Модель оценки результативности процесса» в среде Fuzzy Logic Designer (рис. 4-6).

В рамках разрабатываемой нечеткой системы в качестве алгоритма нечеткого вывода был выбран алгоритм Мамдани, сформирован обобщенный вид модели и параметры нечеткого вывода (рис. 7).

Следующим этапом построения системы являлось формирование базы правил. Модель содержит 25 правил вида «Если-то», также используется логический оператор «И», так как в качестве входных данных определены два параметра (рис. 8).

На выходе пакет расширения Fuzzy Logic Designer формирует интерактивное окно (рис. 9) с возможностью изменения значений входных переменных и просмотра четкого значения выходной переменной «Результативность процесса с учетом риска», в том числе по каждому из заданных правил.

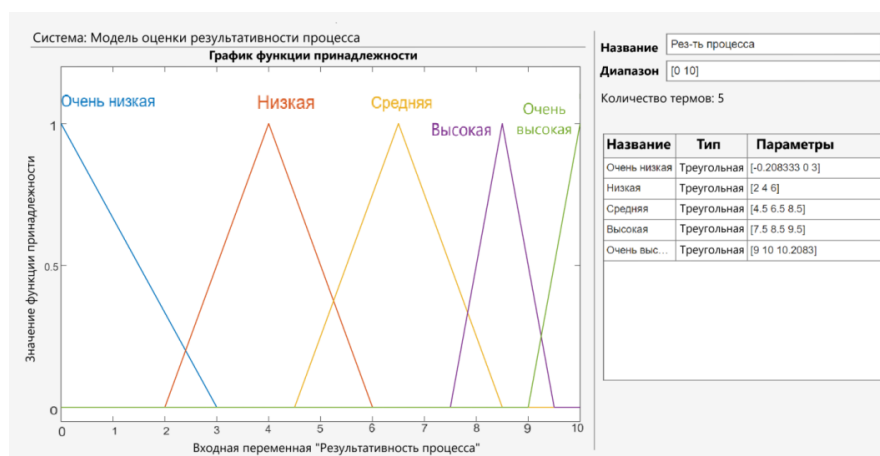


Рис. 4. Терм-множество входной переменной «Результативность процесса»

Fig. 4. Term-set of the input variable “Process efficiency”

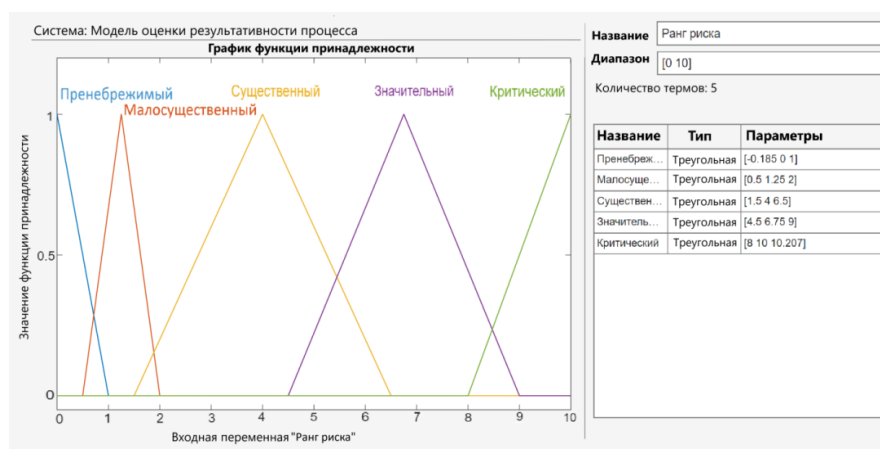


Рис. 5. Терм-множество входной переменной «Ранг риска»

Fig. 5. Term-set of the input variable “Risk Rank”

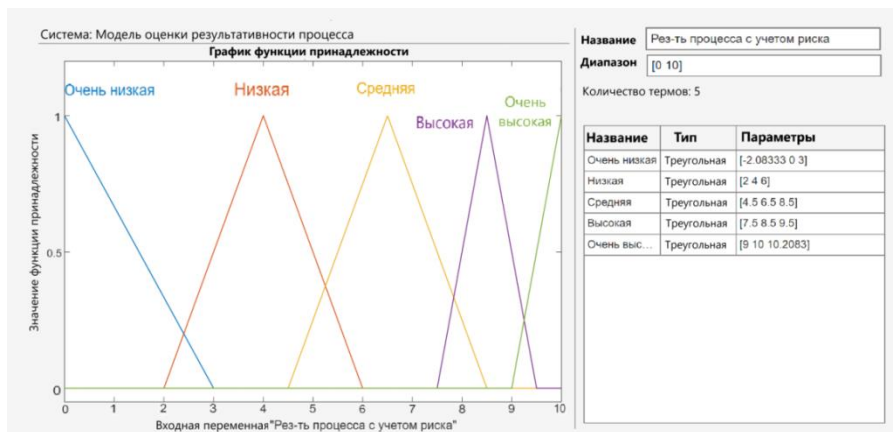


Рис. 6. Терм-множество выходной переменной «Результативность процесса с учетом риска»  
Fig. 6. Term-set of the output variable “Process performance taking into account risk”

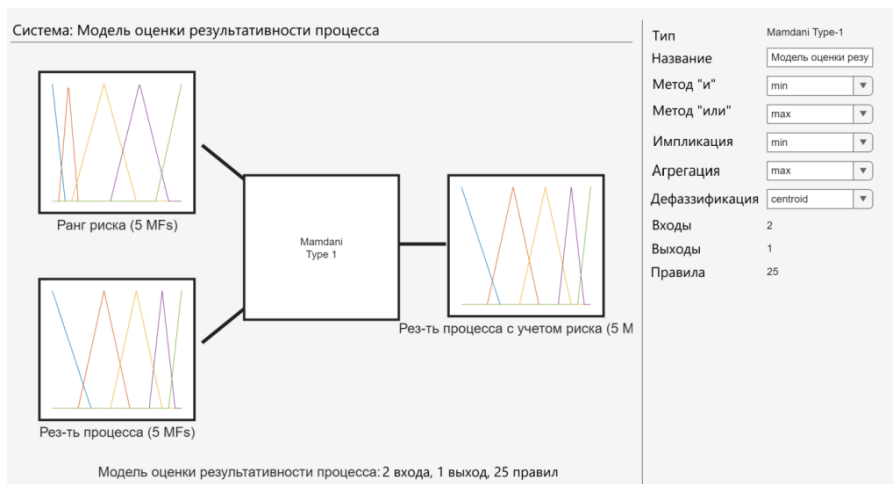


Рис. 7. Общий вид системы «Модель оценки результативности процесса»  
Fig. 7. General view of the “Process Performance Assessment Model” system

Система: Модель оценки результативности процесса			
	Правило	Вес	Название
1	If Ранг риска is Пренебрежимый and Рез-ть процесса is Очень низкая then Рез-ть процесса с учетом риска is Очень низкая	1	rule1
2	If Ранг риска is Малосущественный and Рез-ть процесса is Очень низкая then Рез-ть процесса с учетом риска is Очень низкая	1	rule2
3	If Ранг риска is Существенный and Рез-ть процесса is Очень низкая then Рез-ть процесса с учетом риска is Очень низкая	1	rule3
4	If Ранг риска is Значительный and Рез-ть процесса is Очень низкая then Рез-ть процесса с учетом риска is Очень низкая	1	rule4
5	If Ранг риска is Критический and Рез-ть процесса is Очень низкая then Рез-ть процесса с учетом риска is Очень низкая	1	rule5
6	If Ранг риска is Пренебрежимый and Рез-ть процесса is Низкая then Рез-ть процесса с учетом риска is Низкая	1	rule6
7	If Ранг риска is Малосущественный and Рез-ть процесса is Низкая then Рез-ть процесса с учетом риска is Низкая	1	rule7
8	If Ранг риска is Существенный and Рез-ть процесса is Низкая then Рез-ть процесса с учетом риска is Низкая	1	rule8
9	If Ранг риска is Значительный and Рез-ть процесса is Низкая then Рез-ть процесса с учетом риска is Очень низкая	1	rule9
10	If Ранг риска is Критический and Рез-ть процесса is Низкая then Рез-ть процесса с учетом риска is Очень низкая	1	rule10

Рис. 8. Элемент базы правил системы  
Fig. 8. System rule base’s element

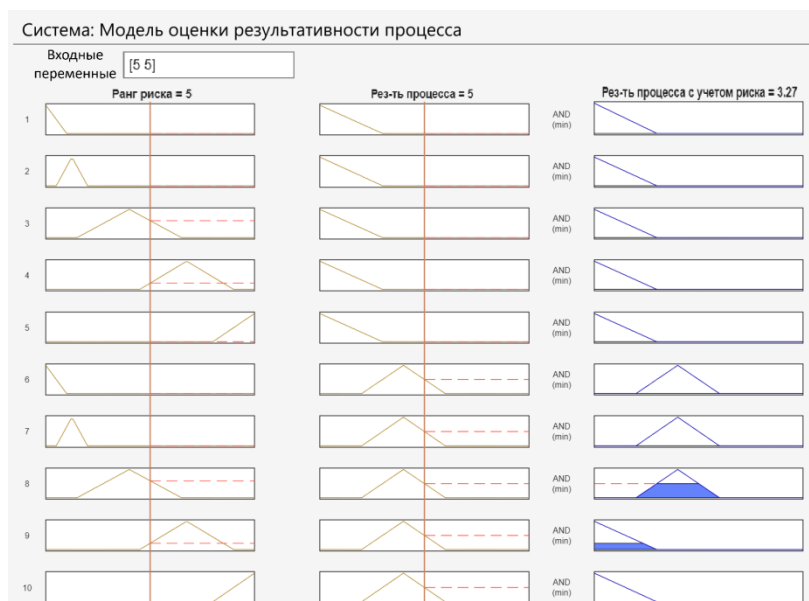


Рис. 9. Вывод оценки результативности процесса с учетом риска

Fig. 9. Conclusion of process performance assessment taking into account risk

Кроме того, в Fuzzy Logic Designer реализована возможность отображения трехмерной поверхности оценки результативности процессов, наглядно демонстрирующей зависимость выходного значения результативности процессов с учетом риска от значений входных параметров (рис. 10).

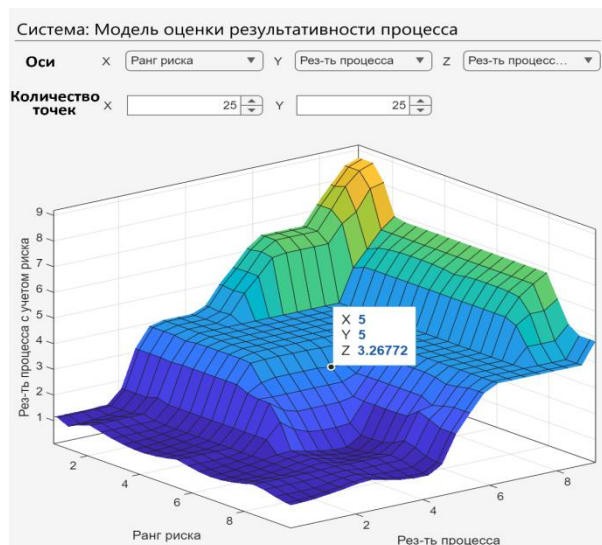


Рис. 10. Поверхность оценки результативности процессов

Fig. 10. Process Performance Assessment Surface

Представленная поверхность оценки результативности процессов содержит в себе значения выходной переменной Z «Результативность процесса с учетом риска» для всех возможных комбинаций двух входных переменных: результативности процесса и величины остаточного риска. Применение данной поверхности распределения на практике целесообразно для понимания зависимостей изменения вели-

чины остаточного риска или результативности процесса (достижения установленных критериев) и его влияния на итоговую оценку результативности процесса. На отмеченной трехмерной поверхности оценки результативности процессов, построенной на использовании различных правил вывода, наблюдается, что более низкий уровень риска занимает большую площадь. Кроме того, переход областей риска не происходит плавно, так как уровень ранга риска приводит к возможности большой разницы между результатами оценки близких точек координат.

Полученные графические данные наглядно демонстрируют причины и предпосылки для разработки корректирующих мероприятий, способствующих достижению намеченных результатов процессов в будущем периоде.

С использованием разработанной нечеткой модели на основе данных о результативности процессов АО «МЕТАКЛЭЙ» и рангов остаточных рисков были получены следующие показатели результативности процессов с учетом влияния остаточных рисков недостижения плановых критериев (выходные четкие значения функции принадлежности  $\mu$ ) (табл. 4).

Полученные в результате применения модели данные о результативности процессов свидетельствуют о неудовлетворительном состоянии процессов О2 «Закупка сырья и материалов» и О65 «Мониторинг и измерение сырья, материалов и готовой продукции». Количество претензий к сырью и материалам со стороны производства на отчетный период составило 3 претензии, достижение показателя OTIF составило 62 % (вместо запланированных 90%), риски недостижения целевых значений критериев результативности отнесены к категории «критических», что при комплексной оценке на основе предложенной модели способствовало снижению итоговой оценки результативности процессов.

Таблица 4. Оценка результативности процессов СМК на основе модели  
 Table 4. Assessing the effectiveness of QMS processes based on the model

Шифр процесса	Наименование процесса	Критерии результативности	Результативность с учетом риска, $\mu$	Качественная характеристика
У1	Анализ СМК со стороны руководства	Выполнение плана развития СМК на отчетный год	8,5	Высокая
О1	Планирование производственной деятельности	Механическая эффективность производственных линий	8,5	Высокая
О2	Закупка сырья и материалов	ОТIF	4	Низкая
О3	Производство композитов	Количество претензий заказчика к готовой продукции (на 60 тыс. т)	8,5	Высокая
О4	Складирование и хранение	Количество случаев нарушения условий хранения на складе	8,5	Высокая
Об1	Управление персоналом	Текущее кадров	8,5	Высокая
Об2	Управление инфраструктурой	Механическая эффективность газопоршневых установок	8,5	Высокая
Об5	Мониторинг и измерение сырья, материалов и готовой продукции	Количество претензий к сырью и материалам со стороны производства	1,14	Очень низкая
В1	Маркетинговые исследования и продажи	Удовлетворенность потребителей	8,5	Высокая

Полученные данные могут быть использованы в качестве основы для углубленного анализа ситуации со стороны компании с последующей разработкой корректирующих мер, направленных на соблюдение сроков поставки сырья и материалов со стороны поставщиков, повышения качества закупаемых материалов, подбора альтернативных поставщиков и повышения адекватности оценки действующих.

### Заключение

В ходе работы были проанализированы некоторые из существующих подходов к оценке результативности СМК, а также подробно описана действующая методика оценки результативности процессов и оценки рисков АО «МЕТАКЛЭЙ» (с учетом корпоративных требований ПАО «Газпром»), рассмотрен математический аппарат построения систем на основе нечеткой логики. В рамках проведенного исследования разработана модель оценки результативности процессов СМК, учитывающая влияние остаточного риска по процессам, базирующаяся на алгоритме нечеткого вывода Мамдани.

Результаты оценки, полученные с применением разработанной системы, наглядно демонстрируют степень влияния рисков недостижения установленных критериев результативности на итоговые показатели процессов.

Резюмируя, следует отметить, что применение методики расчета результативности процессов системы менеджмента качества на основе алгоритма Мамдани позволяет:

1) представить принципиальную схему нечеткой модели оценки результативности процесса, включающую в себя «2 входа – 1 выход, 25 правил», позволяющую учитывать количественные и качественные аспекты, влияющие на результативность процессов СМК, такие как внешние и внутренние факторы, риски;

2) статистически анализировать систему показателей, характеризующих результативность и устойчивость СМК, и вносить в нее соответствующие изменения на основе полученных результатов;

3) отразить трехмерную поверхность оценки результативности процессов СМК в прикладном пакете Fuzzy Logic Designer. Полученная трехмерная поверхность оценки результативности процессов наглядно отображает взаимосвязь между рангом риска, результативностью процессов и результативностью процессов с учетом влияния остаточных рисков недостижения плановых критериев;

4) комплексно оценить результативность каждого процесса СМК, степень влияния рисков на недостижение целевых значений критериев результативности, а также их влияние на оценку результативности системы в целом.

### Список источников

- Искандерова Р.Р. Методика оценки результативности СМК предприятия // Молодой ученый. 2015. № 5 (85). С. 278-280. URL: <https://moluch.ru/archive/85/15905/> (дата обращения: 11.03.2024).
- Редько Л.А., Сальков С.Е., Червова Л.В. Оценка результативности системы менеджмента качества // Вестник науки Сибири. 2013. № 3 (9). С. 65-69.
- Меркушова Н.И. Анализ подходов к оценке результативности систем менеджмента качества в организациях // Проблемы современной экономики: материалы I Междунар. науч. конф. (г. Челябинск, декабрь 2011 г.). Челябинск: Два комсомольца, 2011. С. 127-129. URL: <https://moluch.ru/conf/econ/archive/12/1449/> (дата обращения: 12.03.2024).
- Yao Y.C. Research on effectiveness evaluation method and application of quality management system of manufacturing enterprise based on interval-valued hesitation fuzzy set // In Vibroengineering Procedia. 2017, vol. 14, pp. 294-299. EXTRICA. <https://doi.org/10.21595/vp.2017.18937>



5. Kang Z., Zhao Y., Kim D. Investigation of enterprise economic management model based on fuzzy logic algorithm // *Heliyon*. 2023, vol. 9(8), e19016.
6. О компании АО «МЕТАКЛЭЙ» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.metaclay.ru/o-kompanii/o-kompanii> (дата обращения: 12.03.2024).
7. A Novel Risk Matrix Approach Based on Cloud Model for Risk Assessment under Uncertainty / Jianxing Y., Haicheng C., Shibo W., Haizhao F. // *IEEE Access*. 2021, 9, 27884–27896. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3058392>
8. A risk matrix analysis method based on potential risk influence: A case study on cryogenic liquid hydrogen filling system / Y. Duan, J. Zhao, J. Chen, and G. Bai // *Process Saf. Environ. Protection*. 2016, vol. 102, pp. 277–287. DOI: 10.1016/j.psep.2016.03.022.
9. An Evaluation Model of Smart Manufacturing System Configurations Prior to Implementation Using Fuzzy Logic / Grace J., Mahmoud M.A., Mahdi M.N., Mostafa S.A. // *Appl. Sci.* 2022, 12, 2560. <https://doi.org/10.3390/app12052560>
10. Modeling and simulation of pedestrian dynamical behavior based on a fuzzy logic approach / Zhou M., Dong H., Wang F.-Y., Wang Q., Yang X. // *Inf. Sci.* 2016, 360, 112–130. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.04.018>.
3. Merkusheva N.I. Analysis of approaches to assessing the effectiveness of quality management systems in organizations. *Problemy sovremennoy ekonomiki: materialy I Mezhdunar. nauch. konf.* [Problems of modern economics: Proceedings of the I International scientific conference]. Chelyabinsk: Dva komsomoltsa, 2011, pp. 127–129. Available at: <https://moluch.ru/conf/econ/archive/12/1449/> (Accessed December 3, 2024).
4. Yao Y.C. Research on effectiveness evaluation method and application of quality management system of manufacturing enterprise based on interval-valued hesitation fuzzy set. In *Vibroengineering Procedia*. 2017;14:294–299. EXTRICA. <https://doi.org/10.21595/vp.2017.18937>
5. Kang Z., Zhao Y., Kim D. Investigation of enterprise economic management model based on fuzzy logic algorithm. *Heliyon*. 2023;9(8):e19016.
6. About the company JSC METACLAY. Available at: <https://www.metaclay.ru/o-kompanii/o-kompanii> (Accessed December 3, 2024).
7. Jianxing Y., Haicheng C., Shibo W., Haizhao F. A Novel Risk Matrix Approach Based on Cloud Model for Risk Assessment under Uncertainty. *IEEE Access*. 2021;9:27884–27896. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3058392>
8. Duan Y., Zhao J., Chen J., Bai G. 'A risk matrix analysis method based on potential risk influence: A case study on cryogenic liquid hydrogen filling system. *Process Saf. Environ. Protection*. 2016;102:277–287. DOI: 10.1016/j.psep.2016.03.022.
9. Grace J., Mahmoud M.A., Mahdi M.N., Mostafa S.A. An Evaluation Model of Smart Manufacturing System Configurations Prior to Implementation Using Fuzzy Logic. *Appl. Sci.* 2022;12:2560. <https://doi.org/10.3390/app12052560>
10. Zhou M., Dong H., Wang F.-Y., Wang Q., Yang X. Modeling and simulation of pedestrian dynamical behavior based on a fuzzy logic approach. *Inf. Sci.* 2016;360:112–130. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.04.018>.

### References

Поступила 12.09.2024; принята к публикации 18.10.2024; опубликована 30.06.2025  
Submitted 12/09/2024; revised 18/10/2024; published 30/06/2025

**Дыбулина Наталья Сергеевна** – аспирант,  
Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия.  
Email: dybulinans@gmail.com. ORCID 0009-0006-4139-639X

**Царева Софья Александровна** – кандидат химических наук, доцент,  
Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия;  
Ярославский государственный медицинский университет, Ярославль, Россия.  
Email: zarew@rambler.ru. ORCID 0000-0003-2099-4885

**Nataliya S. Dybulina** – Postgraduate Student,  
Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia.  
Email: dybulinans@gmail.com. ORCID 0009-0006-4139-639X

**Sophia A. Tsareva** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia;  
Yaroslavl State Medical University, Yaroslavl, Russia  
Email: zarew@rambler.ru. ORCID 0000-0003-2099-4885



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 658.5  
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-158-165

## УЛУЧШЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Запорожцев А.В., Хазова Вер.И., Хазова Вик.И.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** Особенностью процессов системы менеджмента качества (СМК) является необходимость рассматривать их с двух точек зрения: с точки зрения сущности процесса преобразования, выполняемого в данном процессе, а также с точки зрения соответствия этого процесса требованиям стандартов серии ISO 9000. В связи с этим процесс СМК можно рассматривать на разных уровнях: уровне элемента производственного потока (оборудование), уровне производственного потока, уровне управления производственным потоком и уровне сети производственных потоков. Для того чтобы цифровой двойник процесса СМК успешно решал задачи повышения эффективности процесса на каждом из упомянутых уровней за счет разработки улучшений, его цифровая модель должна содержать элементы, соответствующие уровню рассмотрения процесса. **Цель работы и методы исследования.** Разработать подход к моделированию процесса СМК, обеспечивающий создание таких моделей, в структуре которых будут элементы, соответствующие реальным процессам. Это позволит поставить в соответствие изменения в модели процесса изменениям в реальном процессе. Для решения этой задачи в работе используется подход системной динамики, что позволяет разрабатывать модели, адекватные реальному процессу как по структуре, так и по поведению. **Результаты.** Рассмотрен вопрос о разработке модели элемента производственного потока (оборудования). Разработана цифровая модель производственного потока и доказана адекватность этой модели основным закономерностям, которые действуют в производственных системах. На основе модели производственного потока построена модель управления производственным процессом. **Практическая значимость.** Предложен подход к разработке моделей производственных процессов, который устанавливает конкретные требования к имитационным моделям в зависимости от концепции улучшения процесса.

**Ключевые слова:** цифровой двойник процесса, имитационное моделирование, производственный процесс, процесс СМК, улучшение процесса СМК, модель улучшений процесса, моделирование производственных процессов

© Запорожцев А.В., Хазова Вер.И., Хазова Вик.И., 2025

### Для цитирования

Запорожцев А.В., Хазова Вер.И., Хазова Вик.И. Улучшение производственных процессов системы менеджмента качества на основе моделирования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 158-165. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-158-165>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# MODELLING BASED IMPROVEMENT OF QMS MANUFACTURING PROCESSES

Zaporozhtsev A.V., Khazova Ver.I., Khazova Vik.I.

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** A feature of the quality management systems (QMS) process is the necessity to consider them from two points of view. One is the content of conversion realized in this process while the other is its compliance with ISO 9000 standards requirements. Therefore, QMS process can be studied at different levels: level of the production flow element (i.e. equipment), production flow level, level of the production flow management and level of production flows network. In order to QMS process digital twin to successfully increase process efficiency on each level by developing improvements its digital model need to comprise elements which correspond to the level of consideration. **Objective and Methods Applied.** The main objective of this paper is to develop such an approach to QMS process modelling that allows creation of models which elements correspond to the real process elements. This allows to match changes in the process model to those of the real process. System dynamics approach is being used to develop models which structure and behaviour are adequate to the real process. **Results.** The authors considered an issue of the model of production flow element (equipment) development. The production flow digital model adequate to production systems basic patterns is developed. This model became a basis for the development of the model of production flow management. **Practical Relevance.** An approach to the development of manufacturing process models is suggested that establishes specific requirements for the simulation models depending on the process improvement concept.

**Keywords:** process digital twin, imitation modelling, manufacturing process, QMS process, QMS process improvement, model of process improvement, manufacturing processes modelling

## For citation

Zaporozhtsev A.V., Khazova Ver.I., Khazova Vik.I. Modelling Based Improvement of QMS Manufacturing Processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 158-165. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-158-165>

## Введение

В связи с быстрыми изменениями в экономике и технологиях адаптивность и изменчивость производственных систем стали ключевыми характеристиками обрабатывающей промышленности [1]. Чтобы повысить свою конкурентоспособность, компаниям необходимо учитывать новые требования рынка и пересмысливать свой производственный процесс с помощью цифровых технологий [2]. В этом контексте с быстрым развитием информационных технологий производственные системы могут быть преобразованы в интеллектуальные [3], где может быть реализована интеграция продуктов и машин во взаимосвязанные физические и цифровые процессы. В этой связи важными являются исследования, в которых рассматривается задача моделирования, анализа и проектирования сложных производственных систем.

Одной из концепций моделирования, применяемых для изучения сложных систем, является имитационное моделирование. К настоящему времени сформировалось три ключевых подхода к разработке имитационных моделей. Первый из них ориентирован на дискретно-событийное моделирование [4], в рамках которого система моделируется совокупностью происходящих в ней событий. Это позволяет максимально точно воспроизводить в имитационной модели все особенности работы элементов моделируемой

системы. Дж. Форрестер предложил методологию моделирования производственных систем путем изучения основных потоков, циркулирующих в производстве [5].

Несмотря на значительные достижения в области использования имитационного моделирования [6], принципы разработки имитационных моделей цифровых двойников процессов СМК в полной мере не исследованы. Важным является вопрос о детальности описания производственного процесса при моделировании. Так как цифровые двойники становятся важным ресурсом производственной системы, их разработка требует определения целей создания цифровых двойников и тех возможностей, которыми они должны обладать для управления производственным процессом. В рамках данного исследования целью создания цифрового двойника процесса СМК является возможность исследования результатов улучшения процесса с помощью его цифровой модели. Для этого цифровая модель процесса должна обладать следующими возможностями:

- соответствовать реальному производственному процессу по структуре и поведению;
- обладать модифицируемостью – возможностью изменять структуру цифровой модели с тем, чтобы она соответствовала структуре измененного производственного процесса.

### Материалы и методы исследования

**Проблемы реализации принципа постоянного улучшения на основе имитационного моделирования.** Инструментом разработки улучшений является цикл PDSA [7], в котором реализуется научный подход к улучшениям. Суть научного подхода в том, что на основе имеющихся знаний о процессе выдвигается гипотеза (предложение по улучшению), которая должна быть проверена объективным методом, а результаты проверки – сопоставлены с выдвинутой гипотезой. Такое сравнение или подтверждает, что предложение по улучшению действительно улучшает показатели процесса, или показывает отсутствие влияния предложения по улучшению на них. Инструментом проверки предложения по улучшению является имитационная модель, которая должна соответствовать следующему принципу: модель процесса, используемая для улучшения, должна содержать элементы, соответствующие элементам реального процесса. То есть любое предложение по улучшению процесса должно формулироваться как изменение одного из элементов реального процесса: характеристик оборудования, правил выполнения операций, принципов управления процессом и т.д.

Объективному описанию реального процесса в наибольшей степени соответствует его функциональная модель в стандарте IDEF0 [8] (рис. 1). В модели процесса присутствуют те объекты, которые есть в реальном процессе, а функции описывают преобразования, которые производятся с этими объектами. Важным элементом функциональной модели являются правила преобразования объектов. Хотя функциональная модель процесса является концептуальной моделью, в которой дается описание принципа работы процесса, она является основой для построения математической модели процесса, так как определяет структуру моделируемого процесса. Для этого математическая модель процесса должна включать математические параметры объектов процесса и математические функции преобразования этих объектов.

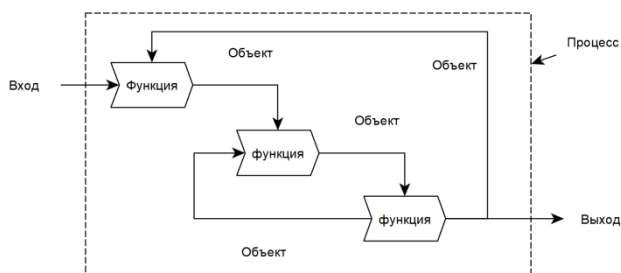


Рис. 1. Функциональная модель процесса

Fig. 1. A functional model of a process

В заключение рассмотрения проблем разработки имитационных моделей для проверки улучшений процессов выдвинута следующая гипотеза: для каждого улучшения необходима индивидуальная цифровая модель. Действительно, так как каждая модель

разрабатывается с определенной целью (улучшения в определенном аспекте производственной системы), то для каждого улучшения необходима индивидуальная модель, которая содержит изменения, представляющие суть улучшения процесса.

**Модель факторов улучшения процесса.** Реальный производственный процесс – это конкретная структура производственного потока, реальные характеристики рабочих станций, принципы управления их совместной работой, использование пакетной обработки объектов, наличие буферов времени, мощности и запасов, их расположение в структуре производственного потока и т.д. Показатели реального производственного процесса всегда ниже теоретических. Основной причиной этого является вариабельность, присущая любому реальному процессу. Исключить действие вариабельности полностью в реальном процессе невозможно, однако возможными направлениями улучшения показателей процессов являются решения, направленные на снижение отрицательного воздействия вариабельности.

Кроме вариабельности на показатели производственного процесса действуют и другие факторы. В статье [9] выделены четыре аспекта, которые рекомендуется учитывать при разработке улучшений производственного процесса. Этими аспектами являются: процесс, поток, сеть процессов, организация производства (рис. 2).

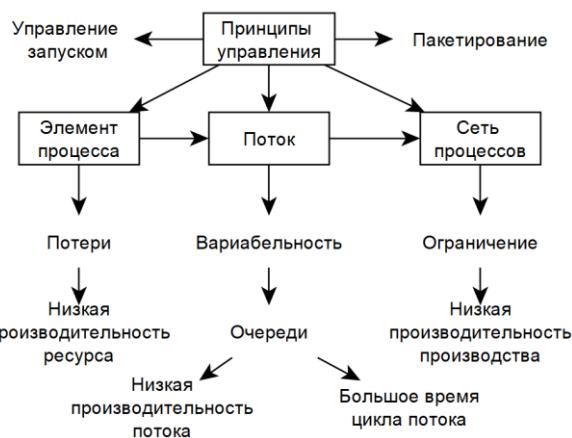


Рис. 2. Аспекты улучшения производственного процесса

Fig. 2. Manufacturing process improvement aspects

Кроме перечисленных аспектов существенное влияние оказывают принципы управления производственным процессом [10].

На основе данной модели можно построить таксономию направлений улучшений. Основу такой таксономии образуют следующие объекты улучшений:

- элемент производственного потока;
- производственный поток;
- сеть производственных потоков;
- принципы управления элементами производственной системы.



В данной работе ограничимся рассмотрением задач улучшений для следующих объектов улучшений:

- элемент производственного потока (оборудование);
- производственный поток;
- принципы управления производственными потоками.

Рассмотрение задач улучшений сети производственных потоков и более детальное изучение принципов управления производственными системами требует предварительного рассмотрения сформулированных выше задач.

*Модель улучшений работы элемента производственного потока (оборудования).* Базовым элементом производственного потока является производственная ячейка, основным элементом которой является производственное оборудование. Работу производственного оборудования принято оценивать показателем «Индекс общей эффективности использования оборудования» (Overall Equipment Effectiveness, OEE) [11]:

$$\text{ОЕЕ-индекс} = \text{Эксплуатационная готовность} \times \text{Эффективность} \times \text{Коэффициент качества.}$$

Эксплуатационная готовность (доступность) – это соотношение, характеризующее связь фактического времени производства с плановым временем занятости персонала для рабочей операции. На показатель доступности влияют поломки оборудования, время на переналадку и регулировку, регистрируемые мелкие остановки.

Эффективность отражает, насколько фактическая работа оборудования близка к номинальной производительности. На эффективность влияют краткосрочные (нерегистрируемые) остановки, замедление скорости работы оборудования.

Коэффициент качества определяется общим количеством продукции установленного качества по сравнению с общим выпуском продукции.

Для повышения показателя ОЕЕ необходимо улучшать все три составляющие этого показателя. Рассматривая системное окружение процесса оценки состояния оборудования (рис. 3), можно выделить следующие процессы, влияющие на показатель ОЕЕ:

- диспетчерское управление предоставляет данные о внеплановых простоях оборудования по причинам отсутствия необходимых ресурсов – материалов, инструмента, рабочих заданий;

- система технического обслуживания и ремонта (ТОиР) предоставляет данные о простоях оборудования при возникновении отказов;

- организация технологического процесса предоставляет данные о потерях рабочего времени при выполнении технологического процесса, снижающих пропускную способность оборудования;

- контроль качества предоставляет данные о количестве дефектных изделий, обнаруженных при контроле качества продукции.

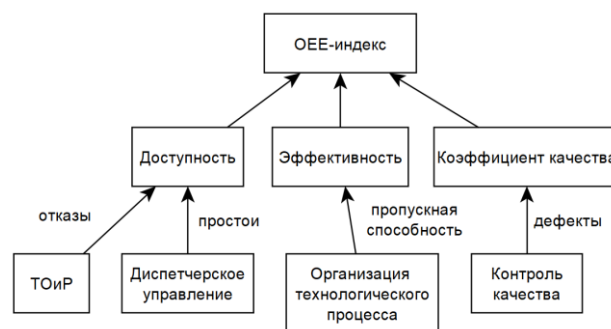


Рис. 3. Процессы, определяющие показатели работы производственного оборудования

Fig. 3. Processes defining the performance indicators of production equipment

Таким образом, для расчета показателя ОЕЕ необходимо собрать данные (простои, отказы, пропускная способность, дефекты) из нескольких процессов. То есть задача определения показателя ОЕЕ является примером кросс-функционального процесса – процесса, отдельные операции которого выполняются в нескольких процессах. Возможно ли построить такую имитационную модель, на которой можно проводить изучение действия изменений, улучшающих работу оборудования по показателю ОЕЕ? Ввиду того, что оценка работы оборудования зависит от нескольких процессов, ставить такую задачу можно только после создания моделей изолированных процессов оперативного управления производством, ТОиР, управления качеством и организации технологического процесса.

*Модель для улучшения производственного потока.* Модель производственного потока представляет собой последовательное соединение производственных ячеек, в каждой из которых происходит обработка объектов труда (рис. 4).

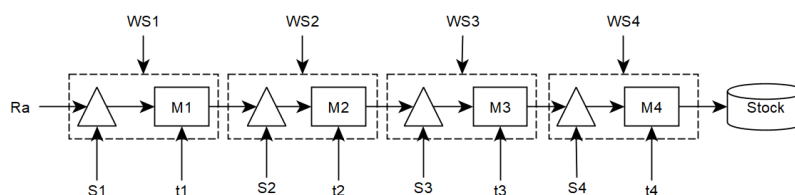


Рис. 4. Модель производственного процесса как потока

Fig. 4. A model of the manufacturing process as a flow

В модель производственного потока входят следующие элементы:

- входной поток заявок  $Ra$  (ед./ед. времени);
- рабочая станция  $WS$  – базовый элемент производственного потока;
- обслуживающее устройство  $M$ -элемент, в котором происходит преобразование объекта потока. Основными показателями обслуживающего устройства являются время обслуживания  $t$  и пропускная способность  $r = 1/t$  (ед./ед. времени);
- очередь объектов на обслуживание  $S$ -элемент, в котором хранятся объекты перед обработкой на обслуживающем устройстве;
- запас объектов, прошедших полный цикл обработки  $Stock$ .

Данная модель отображает физические процессы, происходящие в производственном потоке. Основными закономерностями производственного потока являются [10]:

- формула Кингмана

$$WT = V \cdot U \cdot T, \quad (1)$$

где  $WT$  – время ожидания;

$V$  – фактор вариальности;

$U$  – фактор использования ресурса;

$T$  – среднее операционное время обработки на рабочей станции;

- закон Литтла

$$CT = WIP/TH, \quad (2)$$

где  $TH$  – производительность потока (ед./ед. времени);

$WIP$  (НЗП) – количество объектов в процессе, ед.;

$CT$  – время цикла – время, необходимое объекту, чтобы пройти через весь поток.

Применим для построения модели производственного потока метод моделирования системной динамики [12]. В качестве примера используем модель, которая рассматривается в работе [10] (рис. 5).

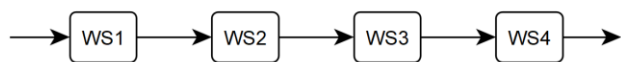


Рис. 5. Теоретическая модель производственного потока

Fig. 5. A theoretical model of the manufacturing process

Соответствующая расчетная модель производственного потока, выполненная в программе iThink, показана на рис. 6.

Каждый элемент производственного потока представлен на рис. 6 совокупностью следующих элементов: очередью объектов на обслуживание (запасами)  $Sti$ , обслуживающими устройствами (станками)  $Mi$ , входными  $Ii$  и выходными  $Oi$  потоками. Запасы  $Sti$  моделируются блоком «Резервуар» (Reservoir), станки  $Mi$  – блоком «Конвейер» (Conveyor), а входные и выходные потоки – блоком «Поток». Блоки-конвертеры  $WIP$ ,  $TH$ ,  $CT$  используются для расчета показателей незавершенного производства, производительности потока и времени цикла соответственно.

Математическая модель поведения производственного потока описывается системой дифференциальных уравнений, включающей четыре ( $i = 1, \dots, 4$ ) разностных уравнения для запасов и четыре ( $i = 1, \dots, 4$ ) разностных уравнений для станков:

$$St_{i,t} = St_{i,t-dt} + (O_{i-1} - I_i)dt, \quad (3)$$

$$M_{i,t} = M_{i,t-dt} + (I_i - O_i)dt. \quad (4)$$

Проведем проверку адекватности предлагаемой модели потоков и запасов путем сравнения результатов ее испытаний с данными теоретической модели [10] в условиях отсутствия вариальности времени обслуживания.

Каждая из четырех рабочих станций (см. рис. 5) выполняет работу за 2 ч и сразу (без задержки) передает работу на следующий станок. Так как время обслуживания у всех рабочих станций одинаковое, то все станки имеют пропускную способность  $r = 1/t = 0,5$  ед./ч.

Тогда чистое операционное время производственного потока равно сумме времени обслуживания всех рабочих станций  $T_0 = 8$  ч, а поскольку вариальность времени обслуживания отсутствует, то есть поток сбалансирован,  $CT = T_0$ . Расчет уровня НЗП в процессе осуществляется по закону Литтла.

В модели потоков и запасов для осуществления тех же расчетов приняты следующие начальные значения параметров:

$$St1 = St2 = St3 = St4 = 0;$$

$$M1 = M2 = M3 = M4 = 1;$$

$$I1 = I2 = I3 = I4 = O1 = O2 = O3 = O4 = 0,5.$$

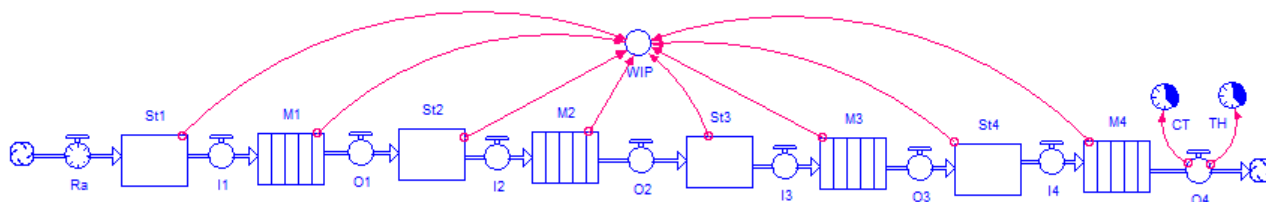


Рис. 6. Модель производственного потока в виде потоков и запасов

Fig. 6. Stock and flow model of the manufacturing process

Производительность потока  $TH$  определяется с помощью встроенной функции  $THROUGHPUT(O4)$ , время цикла  $CT$  – функцией  $CYCLETIME(O4)$ . Объем незавершенного производства  $WIP$  представляет собой сумму объектов в обработке, а также находящихся в запасе:

$$WIP = \sum_i (St_i + Mi) . \quad (5)$$

Данные теоретических расчетов и результаты испытаний модели приведены в **таблице**.

Таблица. Сравнение данных моделирования с теоретическими значениями  
Table. Comparison of simulation data with theoretical values

$R_a$	Теоретический расчет			Результаты испытаний модели		
	$TH$	$CT$	$WIP$	$TH$	$CT$	$WIP$
0,125	0,125	8	1	0,125	8	1
0,250	0,250	8	2	0,250	8	2
0,375	0,375	8	3	0,375	8	3
0,50	0,50	8	4	0,50	8	4

Таким образом, предлагаемая модель производственного потока адекватно описывает его поведение и может служить основой для разработки улучшений производственного процесса СМК, так как содержит объекты этого потока с определенными характеристиками.

Модель для улучшения управления производственными потоками. Важным аспектом повышения эффективности производства является выработка правил управления производством. Для возможности исследовать разные правила управления нужно в модель производственного потока ввести элементы управления и разработать правила управления.

Основным элементом операционного управления производственным процессом является управляющий блок запуска деталей в производство (**рис. 7**). Управление производственным процессом обеспечивается информационными потоками, которые на **рис. 7** показаны пунктирными линиями.

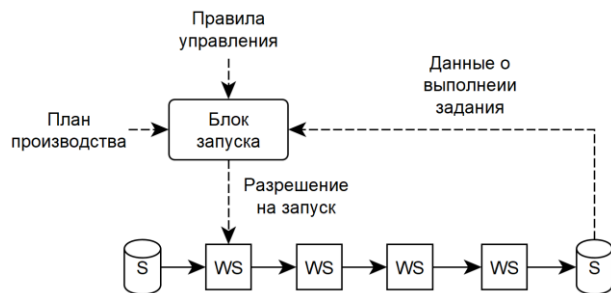


Рис. 7. Модель оперативного управления производственным процессом СМК  
Fig. 7. The operational management model of QMS manufacturing process

План производства устанавливает последовательность заданий, которые должны быть выполнены в

производственном процессе. Правила управления определяют условия, при которых произойдет запуск заданий в производство – будет дано разрешение на выполнение производственного задания. Согласно принципам эффективного управления производственными процессами [10], запуск в производство нового задания производится только после выхода задания из производственного процесса, что обеспечивает поддержание в производственном процессе оптимального уровня НЗП.

Проведем моделирование поведения обобщенной модели в условиях вариабельности времени работы оборудования. Примем, что время обработки заданий рабочей ячейкой задано формулой

$$R_b = T_0 + T_{\text{доп}} \quad (6)$$

где  $R_b$  – выходной поток заданий;

$T_{\text{доп}}$  – дополнительное время обработки, связанное с вариабельностью готовности оборудования.

Результаты моделирования представлены на **рис. 8**.

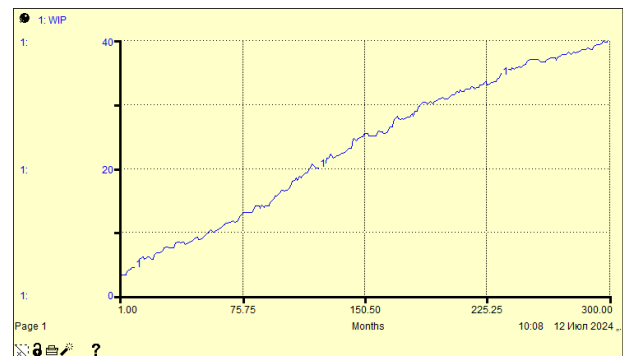


Рис. 8. Поведение производственного процесса без управления

Fig. 8. Behaviour of a manufacturing process without management

Если в производственном потоке действует вариабельность пропускной способности оборудования, то при определенных значениях интенсивности входного потока  $R_a$  стабильного состояния не наблюдается и  $WIP$  будет неуклонно возрастать. Для стабилизации работы производственного потока необходимо в обобщенную модель производственного потока ввести простейший контур управления (**рис. 9**).

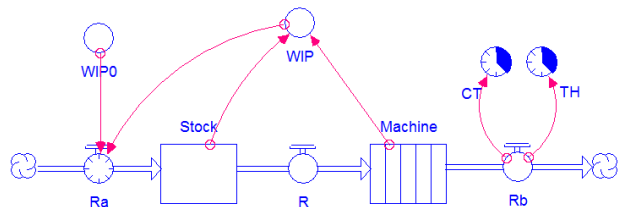


Рис. 9. Модель производственного потока с простейшим контуром управления  
Fig. 9. General model of a manufacturing process with simplest control loop

Управление потоком построено на поддержании оптимального уровня незавершенного производства  $WIP$  [10]. Рассмотрим правило управления производственным потоком, в котором при превышении уровня НЗП в 25 единиц [13] интенсивность входного потока  $R_a$  ограничивается значением 0,1. Если  $WIP$  ниже указанного уровня, то интенсивность входного потока  $R_a$  восстанавливается до максимального уровня, равного 0,5.

В зависимости от текущего значения  $WIP$  входной поток принимает два значения: минимальное значение 0,1 или максимальное значение 0,5. В результате управления производственным потоком поведение производственного потока стабилизируется (рис. 10).

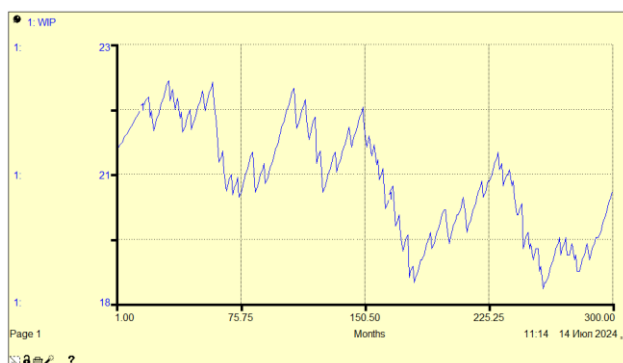


Рис. 10. Поведение производственного процесса с использованием простейшего контура управления

Fig. 10. Behaviour of a manufacturing process with simplest control loop

Данная модель содержит в явном виде закон управления, что позволяет изучать поведение производственного потока при разных параметрах закона управления.

### Заключение

В результате проведенного исследования было сформулировано несколько принципов, обеспечивающих разработку таких цифровых моделей, которые можно использовать в качестве инструмента улучшения процессов. Наиболее важными положениями являются следующие:

1. Модель процесса, которая используется для улучшения, должна содержать элементы, соответствующие элементам реального процесса.
2. Для каждого цикла улучшений процесса нужна индивидуальная модель, содержащая изменения, предлагаемые к внедрению в реальный процесс.
3. Цифровая модель процесса, используемая для улучшения, должна соответствовать уровню рассмотрения процесса. Основными уровнями рассмотрения процесса с целью его улучшения являются: элемент производственного потока (оборудование), производственный поток, управление производственным по-

током, сеть производственных потоков, управление производственными процессами.

5. Разработка улучшений для элемента производственного процесса (оборудования) требует создания совокупности моделей системного окружения работы этого элемента.

6. Показана возможность адекватного описания производственных потоков на основе моделей системной динамики.

7. Рассмотрен вариант управления производственным потоком и его реализация в цифровой модели.

### Список источников

1. Towards adaptable manufacturing systems / N. Keddiss, G. Kainz, C. Buckl, A. Knoll // 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Cape Town, South Africa, 2013, pp. 1410-1415. DOI: 10.1109/ICIT.2013.6505878
2. Florescu A., Barabas S. Modeling and Simulation of a Flexible Manufacturing System – A Basic Component of Industry 4.0. // Applied Sciences. 2020, no. 10, Article 8300. DOI: 10.3390/app10228300
3. Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges / Chen B., Wan J., Shu L., Li P., Mukherjee M., & Yin B. // IEEE Access. 2018, no. 6, pp. 6505-6519. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2783682
4. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2004. 847 с.
5. Форрестер Дж. Основы кибернетики предприятия (Индустриальная динамика). М.: Прогресс, 1971. 340 с.
6. Al-Ahmari A.M., & Ridgway K. An integrated modelling method to support manufacturing systems analysis and design // Computers in Industry. 1999, no. 38, pp. 225-238. DOI: 10.1016/S0166-3615(98)00094-3
7. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. М.: Стандартиформ, 2018. 53 с.
8. Марка Дэвид А., МакГоуэн Клемент. Методология структурного анализа и проектирования SADT. М.: Мета-Технология, 1993. 240 с.
9. Hopp W.J., & Spearman M. The lenses of lean: Visioning the science and practice of efficiency // Journal of Operations Management. 2020, no. 67, pp. 610-626. DOI: 10.1002/joom.1115
10. Hopp W.J., Spearman M.L. Factory Physics: foundations of Manufacturing Management. New York: Irwin/McGraw-Hill, 2001. 720 p.
11. ГОСТ Р ИСО 22400-2-2019. Системы промышленной автоматизации и интеграция. Ключевые технико-экономические показатели (KPIs) для управления производственными операциями. Ч. 2. Определения и описания. М.: Стандартиформ, 2019. 66 с.
12. Richmond Barry. An Introduction to System Thinking with STELLA. ISEE Systems, inc., 2004. 165 p.
13. Pound E. S., Bell J.H., Spearman M.L. Factory Physics for Managers: How Leaders Improve Performance in a Post-Lean Six Sigma World. New York: McGraw-Hill Education, 2014. 384 p.



## References

1. Keddis N., Kainz G., Buckl C., Knoll A. Towards adaptable manufacturing systems. 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Cape Town, South Africa. 2013, pp. 1410-1415. DOI: 10.1109/ICIT.2013.6505878
2. Florescu, A. and Barabas, S. Modeling and Simulation of a Flexible Manufacturing System – A Basic Component of Industry 4.0. Applied Sciences. 2020;10:Article 8300. DOI: 10.3390/app10228300
3. Chen, B., Wan, J., Shu, L., Li, P., Mukherjee, M., & Yin, B. Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges. IEEE Access. 2018;(6):6505-6519. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2783682
4. Kelton W. David, Law Averill M. *Imitatsionnoe modelirovanie* [Simulation Modeling]. Saint-Petersburg: Kyiv: Publishing Group BHV, 2004, 847 p. (In Russ.)
5. Forrester J.W. *Osnovy kibernetiki predpriyatiya (Industrialnaya dinamika)* [Foundations of enterprise cybernetics (Industrial dynamics)]. Moscow: Publishing House Progress, 1971, 340 p. (In Russ.)
6. Al-Ahmari, A.M., & Ridgway, K. An integrated modelling method to support manufacturing systems analysis and design. Computers in Industry. 1999;(38):225-238. DOI: 10.1016/S0166-3615(98)00094-3
7. State Standard GOST R ISO 9000-2015. Quality Management Systems. Fundamentals and vocabulary. Moscow: Standardinform, 2018, 53 p. (In Russ.)
8. Marca David A., McGowan Clement L. *Metodologiya strukturnogo analiza i proektirovaniya SADT* [Structured Analysis and Design Technique SADT]. Moscow: MetaTechnology, 1993, 240 p. (In Russ.)
9. Hopp, W.J., & Spearman, M. The lenses of lean: Visioning the science and practice of efficiency. Journal of Operations Management. 2020;(67):610-626. DOI:10.1002/joom.1115
10. Hopp W.J., Spearman M.L. *Factory Physics: foundations of Manufacturing Management*. New York: Irwin/McGraw-Hill, 2001, 720 p.
11. State Standard GOST R ISO 22400-2-2019. Automation systems and integration – Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management. Part 2: Definitions and descriptions. Moscow: Standardinform, 2019, 66 p. (In Russ.)
12. Richmond Barry. *An Introduction to System Thinking with STELLA*. ISEE Systems, inc., 2004, 165 p.
13. Pound E. S., Bell J.H., Spearman M.L. *Factory Physics for Managers: How Leaders Improve Performance in a Post-Lean Six Sigma World*. New York: McGraw-Hill Education, 2014, 384 p.

Поступила 20.08.2024; принята к публикации 02.09.2024; опубликована 30.06.2025  
Submitted 20/08/2024; revised 02/09/2024; published 30/06/2025

**Запорожцев Александр Валерьевич** – кандидат технических наук, доцент,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.  
Email: wing10@yandex.ru. ORCID 0009-0001-9768-1433

**Хазова Вероника Ивановна** – кандидат технических наук, доцент,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.  
Email: viverha@gmail.com. ORCID 0009-0000-6069-9966

**Хазова Виктория Ивановна** – кандидат технических наук, доцент,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.  
Email: diplomla@mail.ru. ORCID 0009-0003-2338-1635

**Aleksandr V. Zaporozhtsev** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.  
Email: wing10@yandex.ru. ORCID 0009-0001-9768-1433

**Veronika I. Khazova** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.  
Email: viverha@gmail.com. ORCID 0009-0000-6069-9966

**Viktoriia I. Khazova** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.  
Email: diplomla@mail.ru. ORCID 0009-0003-2338-1635

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 658.512  
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-166-175



## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ВЫЧИСЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ПОДВИЖНОСТИ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА НАЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Мазунова Л.Н., Беляков В.В., Ерофеева Л.Н., Бушуева М.Е., Лазаревич С.В., Шетулова Т.Г.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

**Аннотация.** Оценка качества сложных технических изделий является трудоемкой задачей, которая усложняется в том случае, когда оценку нужно получить на стадии проектирования или модернизации. Роль измерителя качества автотракторной техники может исполнять интегральный показатель подвижности. Термин «подвижность» в работах профессора В.В. Белякова трактуется как характеризующий способность выполнять поставленную перед транспортно-технологической машиной задачу с оптимальной адаптивностью к условиям эксплуатации и техническому состоянию самой машины и является наиболее общим эксплуатационным свойством, определяющим качество машины. В предыдущих работах авторов продемонстрирована разработка и применение алгоритма вычисления интегрального показателя подвижности для автомобилей различного оперативно-функционального назначения. Целью работы является разработка и применение методики оценки и повышения подвижности транспортно-технологических машин, базирующейся на полученном алгоритме многокритериальной оценки качества, который предполагает декомпозицию интегрального свойства на простейшие составляющие, а затем агрегирование эмпирических показателей посредством аддитивной свертки с учетом весовых коэффициентов критериев. Реализация алгоритма осуществлялась в среде имитационного моделирования Matlab Simulink. В статье показан результат применения полученной методики, проведен анализ возможности повышения подвижности путем внесения изменений в конструкцию транспортно-технологических средств и комплексов. В качестве объекта для исследования взят колесный снегоболотоход «Воя ЗВМ-39083». В результате были получены пороговые значения отдельных критериев, которые позволяют повысить значение интегрального показателя подвижности до заданного потребителем уровня. Разработанная методика может стать основой системы управления качеством продукции на стадии проектирования автотракторной техники.

**Ключевые слова:** качество, подвижность, транспортно-технологическая машина, наземные транспортно-технологические средства, автотракторная техника, интегральный показатель подвижности, весовые коэффициенты, многокритериальная оценка качества, Matlab Simulink

© Мазунова Л.Н., Беляков В.В., Ерофеева Л.Н., Бушуева М.Е., Лазаревич С.В., Шетулова Т.Г., 2025

### Для цитирования

Применение методики вычисления интегрального показателя подвижности с целью повышения качества наземных транспортно-технологических средств на этапе проектирования / Мазунова Л.Н., Беляков В.В., Ерофеева Л.Н., Бушуева М.Е., Лазаревич С.В., Шетулова Т.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 166-175. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-166-175>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

## APPLICATION OF THE METHODOLOGY FOR CALCULATING THE INTEGRAL MOBILITY INDEX IN ORDER TO IMPROVE THE QUALITY OF GROUND TRANSPORTATION AND TECHNOLOGICAL FACILITIES AND COMPLEXES AT THE DEVELOPMENT STAGE

Mazunova L.N., Belyakov V.V, Erofeeva L.N., Bushueva M. E., Lazarevich S.V., Shetulova T.G.

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** Assessing the quality of complex technical products is a time-consuming task, which becomes more complicated when an assessment needs to be obtained at the design or modernization stage. The integral mobility index can play the role of a quality measure for automotive equipment. The term “mobility” in the works of Professor V.V. Belyakov is interpreted as characterizing the ability to perform the task assigned to the transport and technological machine with optimal adaptability to the operating conditions and technical condition of the machine itself. In previous works authors demonstrated the development and application of an algorithm for calculating the integral mobility index for transport of various operational and functional purposes. The aim of this work is to develop and apply a methodology for evaluating and improving the mobility of transport and technological machines based on the obtained algorithm for multi-criteria quality assessment, which involves the decomposition of an integral property into the simplest components, and then aggregation of empirical indicators by means of additive convolution, taking into account the weighting coefficients of the criteria. The algorithm was implemented in the Matlab Simulink simulation environment. The article shows the result of applying the obtained methodology, analyzes the possibility of increasing mobility by making changes to the design of transport and technological facilities and complexes. The wheeled snowmobile “Вея 3BM-39083” was taken as an object for research. As a result, threshold values of individual criteria were obtained, which make it possible to increase the value of the integral mobility index to a predetermined level. The developed methodology can form the basis of a product quality management system at the design stage of automotive equipment.

**Keywords:** quality, mobility, transport and technological machine, ground transport and technological means, automotive equipment, integral mobility indicator, weighting coefficients, multi-criteria quality assessment, Matlab Simulink

### For citation

Mazunova L.N., Belyakov V.V, Erofeeva L.N., Bushueva M. E., Lazarevich S.V., Shetulova T.G. Application of the Methodology for Calculating the Integral Mobility Index in Order to Improve the Quality of Ground Transportation and Technological Facilities and Complexes at the Development Stage. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 166-175. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-166-175>

### Введение

В настоящее время оценка качества транспортно-технологических машин (ТТМ) на этапе проектирования или модернизации является весьма трудоемкой и малоэффективной задачей, поскольку не существует универсальной методики, позволяющей на основании совокупности оценочных показателей разрабатываемого образца определить его ожидаемое техническое качество, которое может измеряться интегральным показателем подвижности.

Для оценки влияния изменения одного из эмпирических критериев на изменение интегрального показателя подвижности и возможности его повышения до значения эталонного образца был разработан алгоритм, реализованный в пакете визуального программирования Matlab Simulink. Входными данными для расчётов служат значения оценочных показателей, их весовые коэффициенты, интегральный показатель подвижности машины, принятой в качестве эталонной.

Разработка и совершенствование научных инструментов оценки и прогнозирования подвижности

автотракторной техники на стадии проектирования позволит разработать технически сложное изделие с заранее заданным уровнем качества, получить исчерпывающую информацию о разрабатываемой ТТМ с точки зрения ее пригодности и целесообразности использования для решения каких-либо транспортно-технологических задач.

### Подвижность как характеристика технического качества ТТМ

В семидесятых годах прошлого века были разработаны отраслевые инструкции, касающиеся вычисления интегрального показателя качества легковых автомобилей. В дальнейшем они легли в основу работ отечественных ученых. Кроме этого, качество технических объектов оценивалось с помощью показателей эффективности, коэффициента желательности, вычисляемого с помощью функции Харрингтона. Большое количество работ, посвященных оценке технического качества объектов по конкурентоспособности, принадлежат профессору Х.А. Фасхиеву [1-4]. В исследованиях И.А. Плиева

и А.Н. Вержбицкого построена методика оценки качества автотранспорта многоцелевого и двойного назначения [5-7]. Оценка производилась по критериям подвижности, проходимости, производительности, живучести.

В целом методы имеют два основных недостатка. Либо они не в полной мере описывают техническое качество машины, либо ориентированы на оценку качества машины по конкурентоспособности [8].

Для обобщенной оценки качества ТТМ используют критерий конкурентоспособности, так как он включает в себя широкий круг показателей. Качество легковых автомобилей целесообразно измерять его конкурентоспособностью, включающей в себя потребительские характеристики, такие как эстетичность, эргономичность, экологичность, безопасность. Однако вездеходная техника эксплуатируется в тяжелых условиях, осложненных геоклиматическими факторами, слабой несущей способностью поверхности движения, сложностью рельефа местности и сезонностью изменения интенсивности осадков, поэтому наиболее значимым свойством будет служить способность выполнять поставленную задачу в заданных условиях эксплуатации. Свойство подвижности, которому посвящено данное исследование, стоит на более высокой ступени иерархической лестницы показателей, характеризующих конструкцию и техническое состояние ТТМ (рис. 1). В связи с этим работа призвана решить не экономическую, а техническую задачу.

В работах профессора В.В. Белякова подвижность интерпретируется как обобщенная функция эксплуатационных и конструктивных свойств транспортно-технологических машин [9-16], на основе которой вы-

строена система оценочных показателей. С помощью декомпозиции интегрального свойства подвижности на групповые критерии оценочный показатель представим в виде упорядоченного графа. Иерархическая структура свойств (рис. 2) позволяет разработать многокритериальную систему оценки качества транспортно-технологических средств и комплексов по подвижности. Получение оценок подвижности представляет собой, с одной стороны, сложную техническую задачу, а с другой – задачу математического моделирования.

Для расширения номенклатуры измерителей технико-эксплуатационных свойств наземных транспортно-технологических средств (НТТС) был предложен перевод вербальных характеристик подвижности в количественные показатели на основе метода анализа иерархий [17]. В качестве примера получена количественная оценка типа энергетической установки в смысле его влияния на подвижность.

Для разработки системы оценочных показателей произведена классификация ТТМ по функциональному назначению. Это позволило сформировать иерархическую структуру интегрального свойства подвижности с учетом особенностей эксплуатации и режима работы ТС и построить систему векторов весовых коэффициентов. Общий вид интегрального показателя подвижности описывается скалярным произведением вектора групповых нормированных критериев и вектора весовых коэффициентов, который зависит от типа местности и режима работы НТТС. Наилучшее приближение расчетных показателей к экспертным оценкам позволяет получить методика, основанная на многокритериальности с учетом степени важности критериев [18].

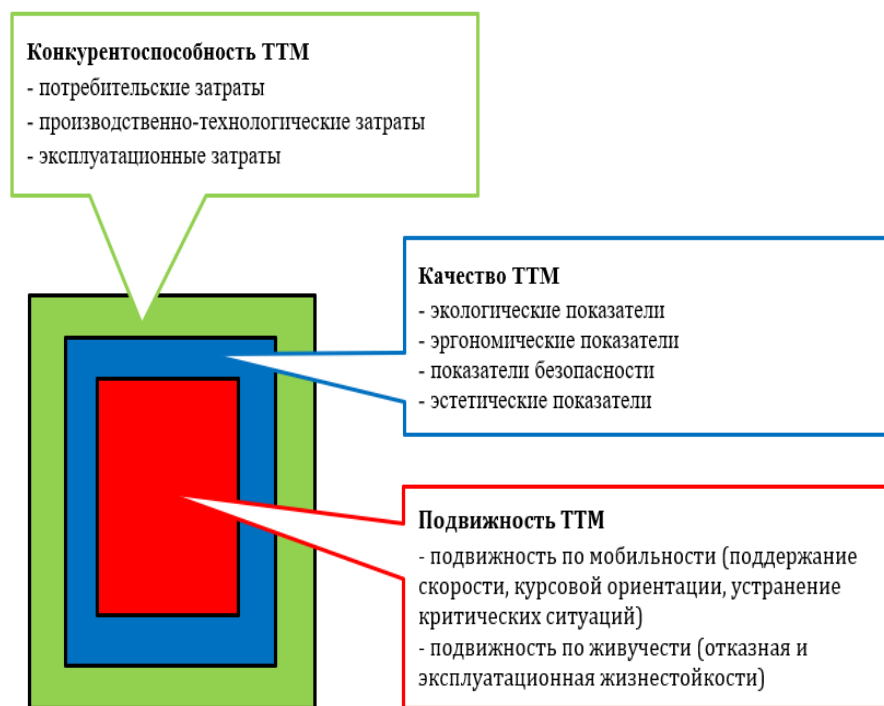


Рис. 1. Взаимосвязь интегральных показателей конкурентоспособности, качества и подвижности ТТМ

Fig. 1. The interrelation of integral indicators of competitiveness, quality and mobility of TTM





Рис. 2. Структура верхних уровней иерархии интегрального показателя подвижности вездеходной техники  
Fig. 2. Structure of the upper levels of the hierarchy of the integral index of mobility of all-terrain vehicles

С помощью разработанной методики были вычислены интегральные показатели подвижности легковых автомобилей, вездеходной техники. Опираясь на вычисленные значения интегрального показателя, была получена оценка подвижности колесных вездеходов [19]. Это позволило сравнивать несколько образцов авто-тракторной техники, произведенной как на различных предприятиях, так и внутри одного производства. При расчётах использовались весовые коэффициенты критериев, соответствующие движению транспортных средств по дорогам с твердым покрытием.

#### Математическая модель анализа изменения интегрального показателя подвижности

Поскольку одна из задач настоящего исследования заключается в построении методики, позволяющей на этапе проектирования и модернизации транспортно-технологических средств и комплексов вносить изменения в конструкцию с целью ее совершенствования, возникает необходимость разработки алгоритма, позволяющего проводить анализ возможности внесения таких изменений.

Для проведения анализа изменения интегрального показателя подвижности при изменении одного из эмпирических критериев был разработан алгоритм (рис. 3). Входными данными для расчётов служат вектор эмпирических показателей  $Q$ , вектор весовых коэффициентов  $W$ , вектора максимальных и минимальных значений параметров  $Q_{\max}$  и  $Q_{\min}$ , значение интегрального показателя подвижности эталонного образца  $F_{\text{эт}}$ . Процесс получения интегрального показателя исследуемой модели машины описан в преды-

дущих работах авторов [19, 20]. В настройках анализа требуется выбрать варьируемый параметр, шаг изменения параметра  $\Delta t$  с учетом направления нормировки, задать длительность имитации.

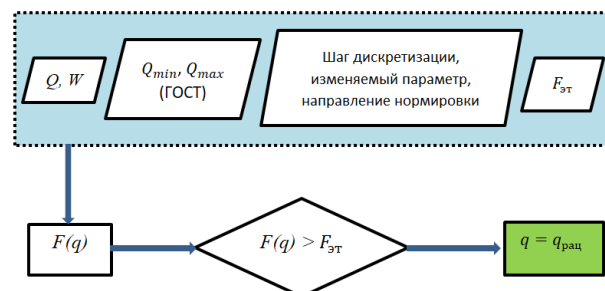


Рис. 3. Схема анализа изменения интегрального показателя подвижности ТТМ  
Fig. 3. The scheme of the analysis of changes in the integral index of mobility of TTM

in the integral index of mobility of TTM

Алгоритм реализован в пакете визуального программирования Matlab Simulink. На одной координатной плоскости выводится график зависимости интегрального показателя подвижности опытного образца от одного из оценочных параметров  $q_i$ , совмещенного с показателем подвижности эталонного образца, который считается постоянным. Графически определяется точка, соответствующая шагу имитации  $t^*$ , на котором значение интегрального показателя подвижности опытного образца достигает значения интегрального показателя эталонного образца и которой соответствует рациональное значение изменяемого параметра  $q_{\text{рац}}$ . Тогда  $q_{\text{рац}} = q_0 + \Delta t \cdot t^*$ , где

$q_0$  – начальное значение варьируемого показателя. На выходе получены графические зависимости интегрального показателя подвижности от эмпирических критериев, позволяющие находить пороговое значение аргумента, при котором интегральный показатель достигает заданного уровня.

#### Применение методики для оценки влияния конструкционных решений

Имитационная модель, построенная в пакете визуального программирования Matlab Simulink, позволяет оценить степень влияния оценочных показателей, а следовательно, и изучить степень влияния на подвижность изменений, вносимых в конструкцию транспортно-технологической машины на стадии проектирования или модернизации.

В качестве объекта для исследования взят колесный снегоболотоход «Вея ЗВМ-39083» с бензиновым двигателем ЗМЗ 40911.10 (рис. 4), выпускаемый ООО «Завод вездеходных машин».

В работе [19] проводилась оценка подвижности выпускаемой вездеходной техники как в целом по стране, так и внутри одного производства. В частности, вычислялась подвижность модельного ряда, разрабатываемого на ООО «Завод вездеходных машин». Интегральный показатель исследуемого образца, вычисленный по значениям эмпирических критериев,

представленных в табл. 1, составлял 1,482 при общем разбросе значений от 0,9 до 1,8.



Рис. 4. Снегоболотоход «Вея ЗВМ-39083»  
Fig. 4. Snowmobile «Вея ЗВМ-39083»

Варьируя различными параметрами машины, можно увеличивать подвижность. В рамках данной статьи ограничимся результатами изменения нескольких оценочных параметров. Ниже представлены графики изменения интегрального показателя подвижности (рис. 5-7). В качестве эталонного взято полученное в экспериментальных исследованиях значение  $F_{эп}=1,5$ .

Таблица 1. Значения эмпирических критериев автомобиля «Вея ЗВМ-39083»

Table 1. Values of empirical criteria of the vehicle «Вея ЗВМ-39083»

Порядковый номер критерия	Обозначение	Расшифровка	Значение критерия	Направление оптимизации критерия
1	$Q_{11}$	Рабочий объем, л	2,693	max
2	$Q_{12}$	Мощность, л.с	112	max
3	$Q_{13}$	Максимальный момент, Н·м	219,5	max
4	$Q_{63}$	Максимально допустимая масса, кг	3300	min
5	$Q_{14}$	Максимальная скорость движения по шоссе, км/ч	50	max
6	$Q_{15}$	Максимальная скорость движения на плаву, км/ч	2,5	max
7	$Q_{21}$	Колея, мм	1800	max
8	$Q_{22}$	Дорожный просвет, мм	600	max
9	$Q_{23}$	База, мм	3040	min
10	$Q_{24}$	Угол подъема (с полной нагрузкой), град	35	max
11	$Q_{25}$	Глубина преодолеваемого брода, м	1,5	max
12	$Q_{31}$	Количество колес, шт.	4	max
13	$Q_{32}$	Давление движителя на грунт, кг/см <sup>2</sup>	0,272	min
14	$Q_{33}$	Давление воздуха в шине	0,15	min
15	$Q_{41}$	Боковой крен (без нагрузки), град	20	max
16	$Q_{51}$	Минимальный радиус поворота (по колес наружного переднего колеса), м.	7	min
17	$Q_{52}$	Соотношение колесной базы и колеи	1,69	min
18	$Q_{61}$	Снаряженная масса без груза, кг	2600	min
19	$Q_{62}$	Грузоподъемность, кг	700	max
20	$Q_{71}$	Длина, мм	5250	min
21	$Q_{72}$	Ширина, мм	2500	min
22	$Q_{73}$	Высота, мм	2750	min
23	$Q_{81}$	Диагональ машины, мм	5814,85	min
24	$Q_{34}$	Наружный диаметр шины, мм	1300	-
25	$Q_{35}$	Ширина профиля шины, мм	700	-

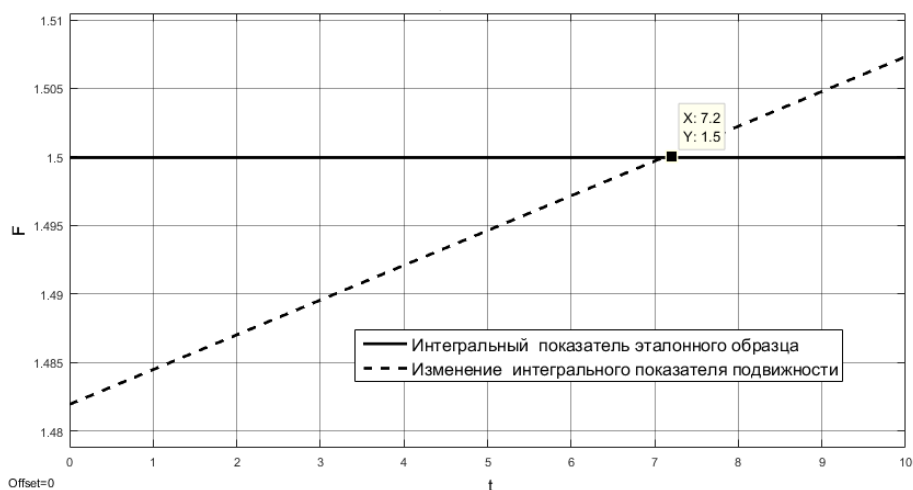


Рис. 5. График изменения интегрального показателя подвижности за счет уменьшения давления движителя на грунт ( $Q_{32}$ )

Fig. 5. Graph of changes in the integral mobility index due to a decrease in the pressure of the propulsor on the ground ( $Q_{32}$ )

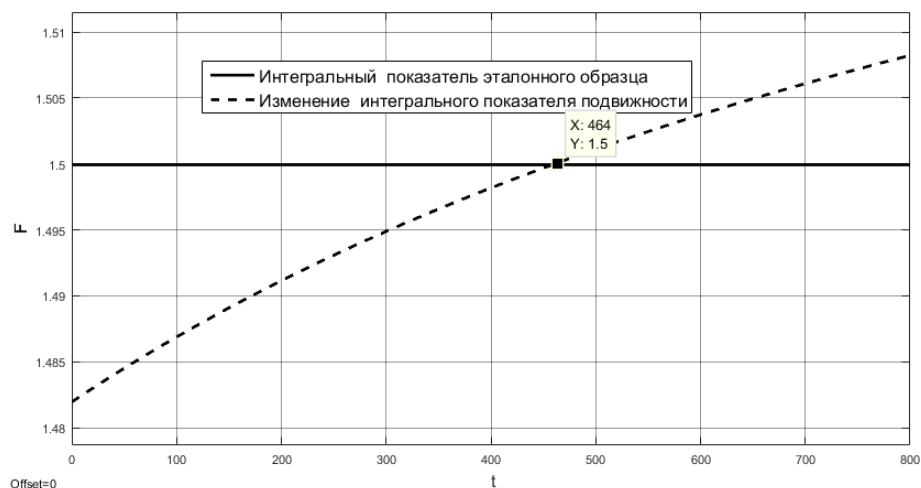


Рис. 6. График изменения интегрального показателя подвижности за счет увеличения наружного диаметра шины ( $Q_{34}$ )

Fig. 6. Graph of changes in the integral mobility index due to an increase in the outer diameter of the tire ( $Q_{34}$ )

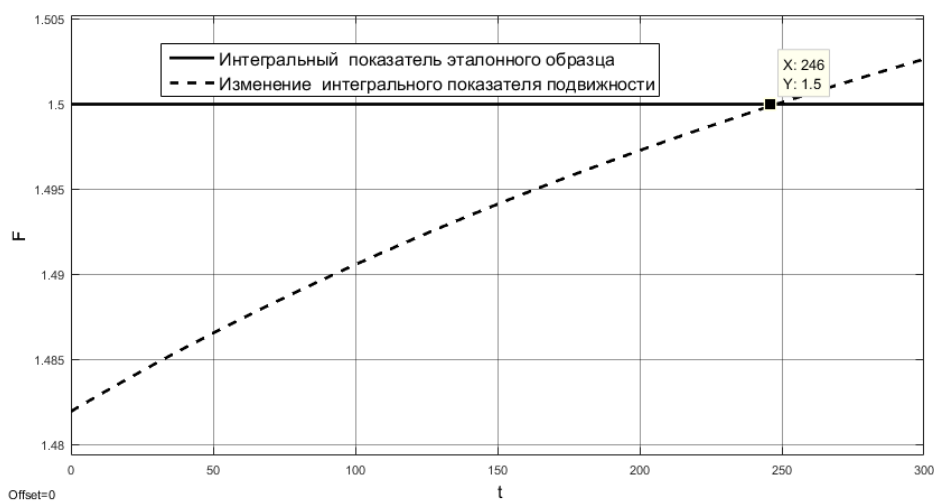


Рис. 7. График изменения интегрального показателя подвижности за счет увеличения ширины профиля шины ( $Q_{35}$ )

Fig. 7. Graph of changes in the integral mobility index due to an increase in the width of the tire profile ( $Q_{35}$ )

Заданного значения  $F_{\text{гт}}=1,5$  показатель подвижности достигает при уменьшении давления движителя на грунт до  $0,2 \text{ кг/см}^2$ . На дорогах с твердой опорной поверхностью во избежание быстрого износа и разрушения дорожного покрытия существует верхний предел ограничений на среднее давление колеса в контакте, составляющий  $0,6 \text{ МПа}$ , для автомобилей повышенной проходимости рекомендуемые значения удельных давлений значительно ниже [21]. Уменьшение давления движителя на грунт можно обеспечить увеличением размеров шин. Это приводит также к улучшению проходимости и увеличению дорожного просвета.

Заданного значения  $F_{\text{гт}}=1,5$  показатель подвижности достигает при увеличении наружного диаметра шины до  $1764 \text{ мм}$  и при увеличении ширины профиля шины до  $946 \text{ мм}$ .

Ниже представлены результаты повышения показателя подвижности за счет улучшения частных критериев опорной проходимости (табл. 2).

Важным условием, улучшающим опорно-сцепную проходимость автомобиля, является снижение давления движителя на грунт. В случае колесных транспортно-технологических машин этот эффект достигается путем снижения их максимально допустимой массы и увеличением площади пятна контакта с опорной поверхностью за счет повышения ширины и диаметра колеса, а также использованием шин низкого давления. Изменение в конструкции, такое как изменение геометрии деталей, материалов, конструктивные особенности могут оказать разнообразное влияние на крутящий момент. Структура интегрального показателя подвижности позволяет оценить это влияние на качество машины. Вопрос технической оценки возможности внесения предлагаемых изменений в конструкцию сводится к различным компоновочным, прочностным или эксплуатационным решениям.

Расчеты доказывают теоретическую возможность увеличения подвижности за счет изменения наружного диаметра и профиля шины, а также снижения давления движителя на грунт. Поскольку существующий ряд производимых шин низкого давления имеет фиксированные дискретные характеристики, целесообразно варьировать двумя параметрами одновременно,

пересчитывая интегральный показатель подвижности для каждой модели шины. В данном случае при использовании шин 28,1R26 Бел-44 МОР 122В с размерными характеристиками  $1700 \times 750-26''$  расчетное значение интегрального показателя подвижности достигает заданного уровня и составит  $1,502$ .

### Заключение

На основе метода многокритериальной оценки качества построен алгоритм вычисления интегрального показателя подвижности путем свертки взвешенного векторного критерия. Построена математическая модель оценки степени влияния изменений, вносимых в конструкцию транспортно-технологической машины, на изменение интегрального показателя подвижности, а также разработана методика повышения показателя подвижности наземных транспортно-технологических средств, позволяющая на стадии проектирования или модернизации повысить качество машины до заданного уровня подвижности.

С помощью разработанной методики проведен анализ возможного улучшения подвижности путем внесения изменений в конструкцию транспортно-технологических средств и комплексов на примере снегоболотохода «Вей 3ВМ-39083». Расчеты проводились в среде имитационного моделирования Matlab Simulink. Проанализировано влияние изменения критериев различных групп показателей, описывающих подвижность ТТМ. В частности, способность снегоболотохода выполнять поставленную задачу можно повысить путем улучшения опорной проходимости, изменяя при этом наружный диаметр и ширину профиля шин, давление движителя на грунт. Полученные данные показывают, что интегральный показатель подвижности транспортного средства быстрее возрастает при изменении эмпирических критериев, имеющих наибольшие весовые коэффициенты. В иерархической системе оценочных показателей присутствуют критерии, за счет которых невозможно увеличение интегрального показателя до заданного уровня, поскольку пределы изменения оценочных показателей ограничены максимально и минимально возможными значениями.

Таблица 2. Параметры анализа увеличения интегрального показателя подвижности за счет изменения частных критериев

Table 2. Parameters of the analysis of an increase in the integral mobility index due to changes in particular criteria

Порядковый номер критерия	Начальное значение критерия $q_0$	Шаг изменения критерия $\Delta t$	Исходное значение интегрального показателя подвижности	Интегральный показатель подвижности эталонного образца	Рациональное значение шага имитации $t^*$	Рациональное значение параметра $q_{\text{рац}}$
13	0,272	-0,01	1,482	1,5	7,2	0,2
24	1300	1	1,482	1,5	464	1764
25	700	1	1,482	1,5	246	946



# Список источников

1. Фасхиев Х.А. Обеспечение конкурентоспособности изделия на этапе разработки // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2012. Т. 16, № 5(50). С. 173-184.
2. Фасхиев Х.А., Крахмалева А.В. Методика оценки качества автомобилей // Экономическое возрождение России. 2006. № 2(8). С. 57-62.
3. Фасхиев Х.А. Интеллектуальная поддержка ранжирования объектов по конкурентоспособности // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2014. Т. 18, № 3 (64). С. 210-224.
4. Фасхиев Х.А., Крахмалева А.В. Методика оценки качества автомобилей // Маркетинг в России и за рубежом. 2005. № 4. С. 86-100.
5. Плиев И.А., Вержбицкий А.Н. Методика оценки качества технического уровня АТС многоцелевого назначения // Автомобильная промышленность. 1999. № 11. С. 34.
6. Плиев И.А. Оценка технического уровня семейств автомобилей многоцелевого назначения на основе метода анализа иерархий // Журнал автомобильных инженеров. 2010. № 3(62). С. 46-49.
7. Плиев И.А. Оценка технического уровня семейств автомобилей многоцелевого назначения на основе метода анализа иерархий // Журнал автомобильных инженеров. 2010. № 5(64). С. 50-54.
8. Обзор подходов к оценке качества и подвижности автотракторной техники, основанных на методах многокритериальной оценки качества / Л.Н. Мазунова, В.В. Беляков, Л.Н. Ерофеева, М.Е. Бушуева // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21, № 3. С. 170-179.
9. Беляков В.В., Голышев Е.Ю. Оценка подвижности транспортно-технологических машин / НГТУ. Н. Новгород, 2002. Деп. в ВИНТИ 10.01.02. №28-В 2002
10. Беляков В.В., Бушуева М.Е., Голышев Е.Ю. Оценка подвижности транспортно-технологических машин // Проблемы качества и эксплуатации автотракторных средств: материалы II международной научно-технической конференции (21-23 мая 2002 г.) / ПГАСА. Пенза, 2002. Ч. 1. С. 23-31.
11. Беляков В.В., Бушуева М.Е., Голышев Е.Ю. Оценка подвижности транспортно-технологических машин // Колесные машины: сб. тр. / МГТУ им. Н.Э. Баумана. М., 2003. С. 29-30.
12. Беляков В.В. Подвижность и конкурентоспособность транспортно-технологических машин // Известия Академии инженерных наук РФ имени акад. А.М. Прохорова. Транспортно-технологические машины и комплексы / под ред. Ю.В. Гуляева. Москва; Н. Новгород: НГТУ, 2003. Т. 5. С. 3-25.
13. Беляков В.В. Оценка подвижности транспортно-технологических систем // «АВТО-НН-2000» (27-29 июня 2000 г): материалы международной научно-технической конференции / НГТУ. Н. Новгород, 2000. С. 339-357.
14. Беляков В.В., Беляев А.М., Бушуева М.Е. Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 3 (100). С. 145-174.
15. Беляков В.В., Бушуева М.Е., Сагунов В.И. Многокритериальная оптимизация в задачах подвижности, конкурентоспособности автотракторной техники и диагностики сложных технических систем: учеб. пособие / НГТУ. Н. Новгород, 2001. 271 с.
16. Беляков В.В. Многокритериальная оценка подвижности автотракторной техники // Интерстроймех-2001: труды международной научно-технической конференции, 27-29 июня 2001 г. / СПбГТУ. СПб., 2001. С. 95-99.
17. Преобразование качественных характеристик автотранспортных средств в количественные показатели с применением метода анализа иерархий / Л.Н. Мазунова, В.В. Беляков, В.С. Макаров [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 1(140). С. 97-106. DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_1\_97. EDN JOIWB1.
18. Сравнительный анализ методов многокритериальной оценки конкурентоспособности и подвижности автотракторной техники с учетом весовой значимости характеристик / Л.Н. Мазунова, В.В. Беляков, В.С. Макаров [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 1(136). С. 125-136. DOI 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_125.
19. Методика вычисления интегрального показателя подвижности колесных вездеходов на основе метода многокритериальной оптимизации / Л.Н. Мазунова, В.В. Беляков, Л.Н. Ерофеева [и др.] // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. № 3. С. 211-222.
20. Разработка методики вычисления показателя подвижности по мобильности легковых автомобилей, основанной на применении многокритериальной оптимизации / Л.Н. Мазунова, М.А. Дубкова, В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. № 2(133). С. 102-112.
21. Кравец В.Н. Теория автомобиля: учебное пособие. Н. Новгород: НГТУ, 2007. 368 с.

## References

1. Faskhiev H.A. Ensuring product competitiveness at the development stage. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Ufa State Aviation Technical University], 2012;16(5(50)):173-184. (In Russ.)
2. Faskhiev H.A., Krahmaleva A.V. Car quality assessment methodology. *Ekonomicheskoe vozrozhdenie Rossii* [The economic revival of Russia]. 2006;(2(8)):57-62. (In Russ.)
3. Faskhiev H. A. Intellectual support for ranking objects by competitiveness. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Ufa State Aviation Technical University], 2014;18(3(64)):210-224. (In Russ.)
4. Faskhiev H.A., Krahmaleva A.V. Car quality assessment methodology. *Marketing v Rossii i za rubezhom* [Marketing in Russia and abroad], 2005;4:86-100. (In Russ.)
5. Pliev I.A., Verzhbitskiy A.N. Methodology for assessing the quality of the technical level of a multipurpose MTS. *Avtomobilnaya promyshlennost* [The automotive industry], 1999;(11):34 - 36. (In Russ.)
6. Pliev I.A. Assessment of the technical level of multipurpose vehicle families based on the hierarchy analysis method. *Zhurnal avtomobilnyh inzhenerov* [Journal of Automotive Engineers], 2010;(3(62)):46-49. (In Russ.)

7. Pliev I.A. Assessment of the technical level of multi-purpose vehicle families based on the hierarchy analysis method. *Zhurnal avtomobilnykh inzhenerov* [Journal of Automotive Engineers], 2010;(5(64)):50-54. (In Russ.)
8. Mazunova L.N., Belyakov V.V., Erofeeva L.N., Bushueva M.E. Review of approaches to assessing the quality and mobility of automotive equipment based on multicriteria quality assessment methods. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2023;21(3):170-179. (In Russ.)
9. Belyakov V.V., Bushueva M.E., Golyshev E.Yu. Assessment of mobility of transport and technological machines. Novgorod: NSTU. 10.01.02. №28-B 2002.
10. Belyakov V.V., Bushueva M.E., Golyshev E.Yu. Assessment of mobility of transport and technological machines. *Problemy kachestva i ekspluatatsii avtotraktorov sredstv: materialy II mezhduнародной nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Problems of quality and operation of motor vehicles: Proceedings of the II International Scientific and Technical Conference]. Penza: PSUAC, 2002, p. 1, pp. 23-31. (In Russ.)
11. Belyakov V.V., Bushueva M.E., Golyshev E.Yu. Assessment of mobility of transport and technological machines. *Kolesnye mashiny: sb. tr.* [Wheeled vehicles: Proceedings]. Moscow: Bauman MSTU, 2003, pp. 29-30. (In Russ.)
12. Belyakov V.V., Gulyaev Yu.V. Mobility and competitiveness of transport and technological machines. *Izvestiya Akademii inzhenernykh nauk RF im. akad. A.M. Prokhorova. Transportno-tekhnologicheskie mashiny i komplekсы* [Proceedings of the Academy of Engineering Sciences of the Russian Federation named after Academician A.M. Prokhorov. Transport and technological machines and complexes]. Moscow, N.Novgorod: NSTU, 2003, vol. 5, pp. 3-25. (In Russ.)
13. Belyakov V.V. Assessment of mobility of transport and technological machines. *AUTO-NN-2000: materialy mezhduнародной nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [AUTO-NN-2000: Proceedings of the International scientific and technical conference]. N. Novgorod: NSTU, 2000, pp. 339-357. (In Russ.)
14. Belyakov V.V., Belyaev A.M., Bushueva M.E. The concept of mobility of ground transportation and technological machines. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of the NSTU named after R.E. Alekseev], 2013;(3):145-174. (In Russ.)
15. Belyakov V.V., Bushueva M.E., Sagunov V.I. *Mnogokriterialnaya optimizatsiya v zadachah podvizhnosti, konkurentosposobnosti avtotraktorov tekhniki i diagnostiki slozhnykh tekhnicheskikh sistem: ucheb. posobie* [Multicriteria optimization in problems of mobility, competitiveness of automotive equipment and diagnostics of complex technical systems: textbook]. N. Novgorod: NSTU, 2001, 271 p. (In Russ.)
16. Belyakov V.V. Multi-criteria assessment of the mobility of tractor equipment. *INTERSTROYMEKH-2001: tr. mezhduнародной nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [INTERSTROYMEKH-2001: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Saint Petersburg: SPbSTU, 2001, pp. 95-99. (In Russ.)
17. Mazunova L.N., Belyakov V.V., Makarov V.S., Mazunova A.P., Erofeeva L.N., Bushueva M.E. Transformation of qualitative characteristics of motor vehicles into quantitative indicators using the hierarchy analysis method. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of NSTU named after R.E. Alekseev], 2023;(1(140)):97-106. (In Russ.)
18. Mazunova L.N., Belyakov V.V., Makarov V.S., Bushueva M.E., Erofeeva L.N., Anikin A.A., Naumov V.N. Comparative analysis of methods of multi-criteria assessment of competitiveness and mobility of automotive equipment, taking into account the weight significance of characteristics. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of NSTU named after R.E. Alekseev], 2022;(1(136)):125-136. (In Russ.)
19. Mazunova L.N., Belyakov V.V., Erofeeva L.N., Makarov V.S., Bushueva M.E. A method for calculating the integral mobility index of wheeled all-terrain vehicles based on the multi-criteria optimization method. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific and Technical Bulletin of Bryansk State University], 2022;(3):211-222. (In Russ.)
20. Mazunova L.N., Dubkova M.A., Belyakov V.V., Bushueva M.E., Makarov V.S., Erofeeva L.N. Development of a methodology for calculating the mobility index for passenger car mobility based on the application of multi-criteria optimization. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of NSTU named after R.E. Alekseev], 2021;(2(133)):102-112. (In Russ.)
21. Kravets V.N. *Teoriya avtomobilya: Uchebnoe posobie* [The theory of the car: Textbook]. N. Novgorod: NSTU, 2007, 368 p. (In Russ.)

Поступила 12.09.2024; принята к публикации 08.11.2024; опубликована 30.06.2025  
Submitted 12/09/2024; revised 08/11/2024; published 30/06/2025

**Мазунова Лариса Николаевна** – старший преподаватель,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.  
Email: matematixx@mail.ru. ORCID 0000-0003-3262-8348

**Беляков Владимир Викторович** – доктор технических наук, профессор,  
начальник управления научно-исследовательских и инновационных работ,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.  
Email: nauka@nntu.ru. ORCID 0000-0003-0203-9403

**Ерофеева Лариса Николаевна** – кандидат физико-математических наук, доцент,  
заведующая кафедрой «Высшая математика»,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.  
Email: erofeevaln@mail.ru. ORCID 0000-0001-6535-1459

**Бушуева Марина Евгеньевна** – кандидат технических наук, доцент, декан ФДП и ДОУ,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.  
Email: bme@nntu.ru. ORCID 0000-0002-0071-2417

**Лазаревич Светлана Валерьевна** – кандидат филологических наук, доцент,  
заведующая кафедрой «Иностранные языки»,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.  
Email: s.lazarevich@nntu.ru. ORCID 0000-0001-6950-0327

**Шетулова Татьяна Гавриловна** – кандидат филологических наук, доцент,  
доцент кафедры «Иностранные языки»,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.  
Email: dmitriy3057@yandex.ru. ORCID 0009-0003-4770-7150

**Larisa N. Mazunova** – Senior teacher,  
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.  
Email: matematixx@mail.ru. ORCID 0000-0003-3262-8348

**Vladimir V. Belyakov** – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Department of Research and Innovation Works,  
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.  
Email: nauka@nntu.ru. ORCID 0000-0003-0203-9403

**Larisa N. Erofeeva** – PhD (Physico-Mathematical Sciences), Associate Professor,  
Head of Department of Higher Mathematics,  
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.  
Email: erofeevaln@mail.ru. ORCID 0000-0001-6535-1459

**Marina E. Bushueva** – PhD (Eng.), Associate professor, Dean of the FP-UT and DL,  
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.  
Email: bme@nntu.ru. ORCID 0000-0002-0071-2417

**Svetlana V. Lazarevich** – PhD (Philological Sciences), Associate professor,  
Head of Department of Foreign Languages,  
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.  
Email: s.lazarevich@nntu.ru. ORCID 0000-0001-6950-0327

**Tatiana G. Shetulova** – PhD (Philological Sciences), Associate professor,  
Associate professor of Department of Foreign Languages,  
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.  
Email: dmitriy3057@yandex.ru. ORCID 0009-0003-4770-7150

# НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 658.562  
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-176-187



## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ПОДОГРЕВОМ БАТАРЕИ МАЛОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ПРИМЕНЕНИЕМ СВЕТОДИОДНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАДАННОГО КАЧЕСТВА ПОЛЕТА

Кузьменко В.П.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** Современные малые беспилотные летательные аппараты предъявляют высокие требования к качеству их работы, особенно в экстремальных условиях эксплуатации. Одним из ключевых факторов, влияющих на надежность и долговечность таких летательных аппаратов, является поддержание стабильных тепловых режимов аккумуляторов в условиях низких температур. Оптимизация теплового управления становится необходимой для обеспечения заданных характеристик полета аппарата и повышения эффективности его системы электропитания. Для обеспечения стабильного качества функционирования системы электропитания малого беспилотного летательного аппарата в таких условиях требуется разработка инновационных подходов к управлению тепловыми процессами. Использование светодиодных осветительных приборов за счет их существенного тепловыделения может стать необычным комбинированным источником не только света, но и тепла для данных авиационных систем, что, в свою очередь, открывает новые перспективы для разработки моделей теплового менеджмента, которые могут обеспечить дополнительное поддержание достаточной для нормальной работы аккумуляторной батареи температуры. **Цель работы.** Разработка модели управления подогревом батареи малого беспилотного летательного аппарата с применением светодиодных систем, направленной на поддержание оптимальных рабочих температур аккумуляторов и повышение надежности и качества полетов в низкотемпературных условиях (до  $-15^{\circ}\text{C}$ ). **Используемые методы.** В рамках данного исследования использован комплексный подход, включающий численное моделирование тепловых процессов на основе дифференциальных уравнений теплопередачи, а также экспериментальные исследования, направленные на оценку эффективности предложенной модели в реальных условиях эксплуатации. Моделирование проводилось с использованием языков программирования Python и MATLAB, что обеспечило высокую точность и адаптивность расчетов. Для симуляции работы системы использованы данные о динамике температурных изменений, характеристиках аккумуляторов и светодиодных источников света. Применены методы оптимального моделирования тепловых процессов, а также анализ соответствия разработанной модели требованиям качества и стандартам эксплуатации в заданных температурных условиях. **Новизна.** Впервые предложена интеграция светодиодных систем в качестве активного элемента теплового менеджмента для беспилотных летательных аппаратов, позволяющая не только обеспечивать освещение, но и выполнять функции обогрева аккумуляторов в экстремальных температурных условиях. Разработанная математическая модель учитывает основные параметры, влияющие на теплопередачу и работу системы, такие как теплоемкость материалов, коэффициенты теплопроводности, конвекции и излучения. Особое внимание уделено моделированию взаимодействия тепловых потоков внутри источника питания малого беспилотного летательного аппарата и учету аэродинамических воздействий на его корпус, что способствует поддержанию необходимого качества полета в экстремальных температурных условиях. **Результат.** Проведенное моделирование и экспериментальные исследования показали, что использование светодиодов для поддержания оптимальной температуры аккумуляторов приводит к значительному увеличению времени их работы. **Практическая значимость.** Применение предложенной модели и стратегии позволяет значительно улучшить эксплуатационные характеристики малых беспилотных авиационных систем, повысить их надежность и эффективность работы в холодных климатических условиях. Разработанная модель может быть внедрена в практику конструирования и эксплуатации малых беспилотных летательных аппаратов, что позволит улучшить качество полетов и эффективность использования данных устройств, расширит область их применения в умеренно холодных климатических условиях.

**Ключевые слова:** тепловой менеджмент, малые беспилотные летательные аппараты, малые беспилотные авиационные системы, управление качеством полета, подогрев источника питания, светодиодные источники света, энергоэффективность, оптимизация работы, управление качеством

© Кузьменко В.П., 2025

### Для цитирования

Кузьменко В.П. Разработка модели управления подогревом батареи малого беспилотного летательного аппарата с применением светодиодных систем для обеспечения заданного качества полета // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 176-187. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-176-187>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



# DEVELOPMENT OF A BATTERY HEATING CONTROL MODEL FOR A SMALL UNMANNED AERIAL VEHICLE USING LED SYSTEMS TO ENSURE THE SPECIFIED FLIGHT QUALITY

Kuzmenko V.P.

St. Petersburg State University University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** Modern small unmanned aerial vehicles impose high demands on their performance quality, especially in extreme operating conditions. One of the key factors affecting the reliability and longevity of such vehicles is maintaining stable thermal conditions for the batteries in low-temperature environments. Optimizing thermal management becomes necessary to ensure the specified flight characteristics and improve the efficiency of the vehicle's power supply system. To maintain stable power system performance for small unmanned aerial vehicles under such conditions, the development of innovative approaches to thermal management is required. The use of LED lighting devices, due to their significant heat generation, can serve as an unconventional combined source of both light and heat for these aerial systems. This opens new prospects for the development of thermal management models that can provide additional support in maintaining the battery temperature at levels sufficient for normal operation. **Objectives.** The goal of this work is to develop a battery heating management model for small unmanned aerial vehicles using LED systems, aimed at maintaining optimal operating temperatures for the batteries and improving the reliability and quality of flights in low-temperature conditions (down to -15 degrees Celsius). **Methods Applied.** This study utilizes a comprehensive approach that includes numerical modeling of thermal processes based on differential heat transfer equations, as well as experimental research aimed at evaluating the efficiency of the proposed model in real-world operating conditions. The modeling was conducted using Python and MATLAB programming languages, ensuring high accuracy and adaptability of the calculations. The simulation of the system's operation was based on data concerning the dynamics of temperature changes, battery characteristics, and LED light sources. Methods of optimal thermal process modeling were applied, along with an analysis of the compliance of the developed model with quality and operational standards under the specified temperature conditions. **Originality.** For the first time, the integration of LED systems as an active element of thermal management for small unmanned aerial vehicles is proposed, enabling not only illumination but also battery heating in extreme temperature conditions. The developed mathematical model takes into account the main parameters affecting heat transfer and system performance, such as material heat capacity, thermal conductivity coefficients, convection, and radiation. Special attention is given to modeling the interaction of thermal flows within the power source of small unmanned aerial vehicles and accounting for aerodynamic effects on its body, which helps maintain the required flight quality under extreme temperature conditions. **Result.** The conducted modeling and experimental studies showed that using LEDs to maintain optimal battery temperatures leads to a significant increase in battery life. **Practical Relevance.** The application of the proposed model and strategy significantly improves the operational characteristics of small UAVs, enhancing their reliability and efficiency in cold climatic conditions. The developed model can be integrated into the design and operation of small UAVs, improving flight quality and the effective use of these devices, thereby expanding their applicability in moderately cold climatic regions.

**Keywords:** thermal management, small unmanned aerial vehicles, small unmanned aerial systems, flight quality management, power source heating, LED light sources, energy efficiency, performance optimization, quality management

## For citation

Kuzmenko V.P. Development of a Battery Heating Control Model for a Small Unmanned Aerial Vehicle Using Led Systems to Ensure the Specified Flight Quality. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 176-187. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-176-187>

## Введение

Расширение областей применения малых беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в различных климатических условиях, включая регионы с низкими температурами до -30°C, ставит перед разработчиками задачу обеспечения стабильного качества полета в таких экстремальных условиях. Низкие температуры негативно влияют на характеристики литий-ионных аккумуляторов, снижая их емкость и мощность, что может привести к сокращению времени полета и снижению надежности работы БЛА. Одним из перспективных решений

данной проблемы является использование светодиодных систем не только для освещения, но и в качестве источников тепла для подогрева аккумуляторных батарей. Светодиоды обладают высокой энергоэффективностью и способностью выделять достаточное количество тепла при работе, что позволяет эффективно использовать их для поддержания оптимальной температуры аккумуляторов.

Целью данной работы является разработка модели управления подогревом батареи малого беспилотного летательного аппарата с применением светодиодных систем для обеспечения заданного качества полета.

Предложенная модель позволит поддерживать оптимальный температурный режим аккумуляторной батареи, обеспечивая стабильную работу БЛА и повышение его эксплуатационных характеристик в условиях низких температур. Светодиоды (светоизлучающие диоды) являются полупроводниковыми устройствами, которые преобразуют электрическую энергию непосредственно в свет. Они обладают высокой энергоэффективностью, долгим сроком службы и устойчивостью к вибрациям и ударам, что делает их идеальными для использования в беспилотных авиационных средствах [1]. Светодиоды применяются в БЛА для различных задач, включая навигационное освещение, сигнальные системы и задачи, связанные с изображениями и видеонаблюдением. Благодаря их малому весу и низкому энергопотреблению, они особенно привлекательны для применения в БЛА, где каждый грамм и каждый ватт имеют значение [2].

Последние исследования в области материаловедения и светотехнических технологий привели к созданию светодиодов с более высоким световым потоком и пониженным энергопотреблением, что способствует повышению эффективности и увеличению времени работы малых БЛА при использовании данных систем в качестве систем освещения или поисковых прожекторов [3]. Кроме того, разработка интеллектуальных систем управления освещением позволяет оптимизировать использование света в зависимости от условий окружающей среды и потребностей миссии [4]. Однако в условиях низких температур эксплуатация светодиодов и аккумуляторных батарей сталкивается с рядом проблем, связанных с терморегулированием и поддержанием оптимальных рабочих параметров. При этом одной из ключевых проблем является терморегулирование светодиодов, что важно для поддержания их эффективности и долговечности [5]. Также существует потребность в дальнейшем снижении энергопотребления светодиодных систем при их использовании на малых БЛА для увеличения времени полета [6]. В итоге терморегулирование аккумуляторных батарей и светодиодных систем является критически важным для обеспечения стабильной работы БЛА и достижения заданного качества полета.

Светодиодные технологии позволяют использовать данные источники света не только как осветительные приборы, но и как способ передачи информации и сенсорные устройства. Например, светодиоды могут использоваться для передачи данных с помощью технологии видимого света (VLC – Visible Light Communication) [7]. Этот метод позволяет БЛА передавать данные на землю или между собой, используя модулированный свет. Светодиоды могут также функционировать как фотодетекторы, обнаруживая изменения в окружающем освещении. Это свойство можно использовать для сенсорных приложений, например для обнаружения препятствий или навигации. Интеграция светодиодов и фотодетекторов в БЛА позволяет использовать эти устройства для обнаружения изменений в окружающей среде, что может быть полезно в задачах мониторинга и разведки.

Таким образом, интеграция светодиодных источников света с другими бортовыми системами, такими как системы навигации и управления, может повысить об-

щую функциональность и эффективность аппарата. Так, недавно была исследована новая экономически эффективная беспроводная передача данных полевых датчиков на сервер на основе светодиодов [8]. Исследования также ведутся в области использования светодиодов для обеспечения энергоэффективной связи в сетях БЛА, включая оптимизацию развертывания и использование диффузоров для расширения зоны покрытия полета [9].

В целом анализ актуальных исследований по внедрению передовых осветительных технологий в жизненный цикл малых БЛА показывает, что интеграция моделей управления светодиодными системами не только в качестве источников света, но и в качестве источников тепла для подогрева аккумуляторов предоставляет возможность эффективного решения проблемы их терморегуляции. Это способствует повышению качества полета за счет поддержания оптимальных эксплуатационных параметров аккумуляторов в условиях окружающей среды. Такой подход соответствует принципам бережливого производства и способствует повышению эффективности использования энергии и ресурсов системы, а также улучшению эксплуатационных характеристик малых БЛА.

### Материалы и методы исследования

Для обеспечения стабильного качества работы малых БЛА в условиях эксплуатации при низких температурах критически важно контролировать тепловой режим аккумуляторов. Температурные условия эксплуатации малых БЛА в данной работе рассматриваются в диапазоне от  $-15$  до  $-30^{\circ}\text{C}$ , что соответствует условиям умеренно холодного климата, характерного для европейской части России и крайнего северо-запада умеренного пояса в пределах Западной Сибири. Поддержание рабочих характеристик аккумуляторов в таких условиях требует применения моделей теплового управления или хотя бы управления подогревом для повышения эффективности системы электропитания и соблюдения стандартов качества.

Одной из задач, связанных с управлением качеством, является обеспечение стабильной работы аккумуляторных батарей при изменении физических свойств атмосферы. Например, плотность воздуха снижается с высотой над уровнем моря, что усложняет управление тепловыми процессами.

Физические свойства атмосферы зависят от плотности воздуха, которая определяется высотой над уровнем моря, атмосферным давлением и температурой окружающей среды. Стандартные атмосферные условия определяются на уровне моря при температуре  $+15^{\circ}\text{C}$  и барометрическом давлении  $1013,25$  гПа. Этот базовый уровень используется для расчета «высоты плотности» в зависимости от преобладающих условий окружающей среды. При повышенных температурах высота плотности увеличивается, в то время как в более прохладных условиях она уменьшается. И наоборот, снижение атмосферного давления приводит к увеличению высоты плотности. На больших высотах плотности подъемная сила, создаваемая роторами БЛА, уменьшается, что может привести к ограничению максимального эксплуата-

ционного веса до значений, ниже указанных производителем.

На высоте 1500 м над уровнем моря, при температуре окружающей среды  $+35^{\circ}\text{C}$  и атмосферном давлении 970 гПа расчетная высота плотности приближается к 3000 м относительно стандартной атмосферы на уровне моря. И наоборот, на высоте 50 м над уровнем моря, при температуре окружающей среды  $-20^{\circ}\text{C}$  и атмосферном давлении 1035 гПа полученная высота плотности приблизительно равна 1450 м по отношению к стандартной атмосфере на уровне моря.

Умеренно холодные условия эксплуатации оказывают значительное влияние на качество функционирования малых БЛА, особенно на их аккумуляторные батареи, которые чувствительны к изменению температурных режимов. Для обеспечения стабильных эксплуатационных характеристик, соответствующих требованиям качества, необходимо учитывать следующие ключевые аспекты влияния температуры на работу литий-ионных аккумуляторов [9, 10]:

1) при низких температурах, близких к  $0^{\circ}\text{C}$ , вязкость электролита в литий-ионных аккумуляторах увеличивается, что затрудняет движение ионов лития между анодом и катодом. Это приводит к снижению разрядной емкости батареи и её мощности, что негативно сказывается на времени автономной работы аппарата;

2) понижение температуры повышает внутреннее сопротивление аккумуляторов, что снижает их эффективность и может привести к резкому падению напряжения под нагрузкой. В условиях эксплуатации малых БЛА в температурном диапазоне до  $-15^{\circ}\text{C}$  это становится критическим фактором, влияющим на качество полета;

3) в литиевых аккумуляторах химические реакции, происходящие при зарядке и разрядке, замедляются при снижении температуры, что также влияет на их эффективность и срок службы;

4) зарядка литий-ионных аккумуляторов в условиях отрицательных температур может привести к образованию литиевых дендритов, что увеличивает риск короткого замыкания и даже взрыва батареи и требует особого контроля качества и соответствия параметров в процессе эксплуатации;

5) когда теплый воздух внутри малого БЛА встречается с холодными поверхностями (например, корпусом малого БЛА, который охладился во время полета при холодной погоде), влага из теплого воздуха может конденсироваться на этих поверхностях, что, в свою очередь, увеличивает вероятность коррозии и повреждения внутренних компонентов, что снижает надежность работы системы.

Поддержание требуемых температурных условий является необходимым фактором для продления срока службы аккумуляторов и улучшения качества эксплуатации малых БЛА в условиях умеренно холодного климата. Литий-ионные аккумуляторы оптимально хранятся при температуре около  $15^{\circ}\text{C}$ , в прохладной и лишенной влаги среде. Обычно рекомендуется хранить эти батареи в температурном диапазоне от  $5$  до  $20^{\circ}\text{C}$ , чтобы сохранить их целостность и продлить срок службы [10, 11]. Когда температура опускается ниже  $0^{\circ}\text{C}$ , эффектив-

ность литий-ионных батарей существенно снижается, в первую очередь из-за замедления внутренних химических реакций.

При снижении температуры происходит заметное уменьшение уровня заряда (принятого к обозначению как «SOC» – от англ. state of charge), в частности, падение температуры с  $25^{\circ}\text{C}$  до  $-15^{\circ}\text{C}$  приводит к снижению уровня заряда батареи примерно на 23%. Это снижение отражает уменьшение доступной емкости при более низких температурах [12].

При пониженных температурах вязкость электролита батареи увеличивается, что, в свою очередь, снижает его ионную проводимость и увеличивает внутреннее сопротивление батареи. Такое увеличение сопротивления, связанное с вязкостью, негативно сказывается на общей производительности батареи.

Для смягчения негативных эффектов низких температур и повышения качества работы литиевых аккумуляторов используются различные технические решения, такие как предварительный подогрев, применение адаптированных электролитов для работы в умеренно холодных условиях, а также оптимизация систем управления батареями. Эти подходы позволяют улучшить эксплуатационные характеристики малых БЛА и подчеркнуть необходимость дальнейшего развития стандартов в области управления качеством тепловых процессов.

На данный момент стандарты для таких систем не разработаны в полной мере, что требует внедрения новых подходов и регламентов для обеспечения стабильного и предсказуемого качества эксплуатации малых БЛА в условиях умеренно холодного климата. Развитие этих стандартов критично для обеспечения надежности и повышения эффективности работы систем электропитания малых БЛА.

Помимо этого, погодные условия, такие как ветер, дождь и снег, могут повлиять на аэродинамику малого БЛА. Ветер может особенно сильно повлиять на скорость и энергоэффективность малого БЛА, требуя больше энергии для поддержания управляемости и стабильного полета.

Неблагоприятная погода также может повлиять на функциональность датчиков малого БЛА. Например, туман, дождь или снег могут ухудшить видимость камеры и помешать работе инфракрасных датчиков, GPS и других навигационных приборов, что снижает надежность и точность выполнения миссий.

Согласно классификации БЛА, разработанной Ассоциацией «Аэронекст» и рабочей группой при Минпромторге России для понимания различных типов и размеров БЛА, а также их потенциальных сценариев применения, светодиодные системы могут быть интегрированы в различные классы БЛА с учетом их теплового менеджмента.

В малых БЛА (обозначаемых «С-Л», «МР-СЛ», «В-Л») светодиоды обычно используются для навигационного освещения и могут выполнять роль индикаторов состояния. Тепловой менеджмент здесь важен из-за меньшего размера, управление тепловыми процессами здесь играет ключевую роль с точки зрения обеспечения исключения взаимного влияния термоактивных узлов

БЛА друг на друга для обеспечения заданной надежности.

В средних и крупных БЛА (обозначаемых «С-С», «МР-С», «В-С», «К-С», «Г-С») светодиоды могут использоваться как для навигационных целей, так и для специальных задач, таких как освещение при посадке или в рамках оборудования для аэрологистики. Тепловой менеджмент становится более значимым, особенно для поддержания оптимальной производительности и долговечности светодиодов.

В крупногабаритных БЛА (обозначаемых «В-Т», «МР-Т», «С-Т», «К-Т», «Г-Т») светодиоды могут использоваться в более требовательных и разнообразных сценариях, включая длительные миссии и сложные условия эксплуатации. Здесь тепловой менеджмент критичен для обеспечения надежности и безопасности системы, особенно при работе в экстремальных температурных условиях.

Каждый класс БЛА предъявляет свои требования к светодиодным системам и соответствующему тепловому менеджменту. Понимание этих требований поможет в разработке оптимальных решений для каждого конкретного применения БЛА.

Рассмотрим классификацию источников света для малых БЛА по функциональному признаку с учетом их роли в управлении качеством тепловых процессов:

1. Источники навигационного света. Данные источники расположены преимущественно на поворотных концах БЛА, это могут быть грани, крылья, хвост или нос, эти источники света необходимы для улучшения видимости БЛА. Они имеют решающее значение для определения ориентации и направления движения БЛА. Световой поток и угловая дисперсия этих огней должны быть разработаны для оптимизации видимости в широком диапазоне условий освещения окружающей среды. Световой поток и тепловая отдача таких огней могут быть использованы для оптимизации распределения тепла, что способствует поддержанию качества функционирования аккумуляторных батарей в условиях умеренно холодного климата.

2. Источники посадочного света. Данные источники крепятся к нижней части БЛА и предназначены для излучения концентрированного луча света вниз. Основная функция – освещать посадочную площадку во время операций в условиях недостаточного освещения или в ночное время, тем самым повышая безопасность за счет визуальных подсказок о рельефе местности и препятствиях на пути посадки. Обеспечение дополнительного тепла при посадке в условиях низкой освещенности позволяет повысить надежность работы системы в сложных климатических условиях, что напрямую связано с управлением качеством полета.

3. Специальные источники света. Данные источники света применяются для выполнения конкретных оперативных функций, они могут включать в себя высокоинтенсивные прожекторные лучи для освещения во время поисковых операций или встроенное освещение в системах видеонаблюдения для улучшения захвата изображения в условиях низкой освещенности. Спектральные характеристики и интенсивность таких источ-

ников света подбираются в соответствии с конкретными оперативными требованиями, например, инфракрасное освещение для тепловидения или усиленное освещение для захвата видео высокой четкости.

4. Источники сенсорного света. Данные источники расположены в непосредственной близости от коммуникационных и сенсорных устройств, таких как антенны и навигационные датчики, эти источники света выполняют вспомогательные функции, которые могут включать подачу сигналов в системах не прямой связи или расширение возможностей датчиков в условиях переменной внешней освещенности. Их конфигурация часто специализируется на взаимодействии с конкретными сенсорными технологиями, возможно, с различными длинами волн и схемами модуляции для передачи данных или улучшения работы датчиков. Это способствует повышению общей эффективности и повышению качества полета малых БЛА.

Разработка систем управления теплом должна учитывать широкий диапазон внешних температурных условий, в которых могут эксплуатироваться малые БЛА. Эти условия влияют на стабильность работы ключевых компонентов и, следовательно, на общее качество выполнения миссий БЛА. Модель должна описывать интеграцию светодиодных систем с другими бортовыми элементами с учетом обеспечения оптимального теплового баланса системы и, следовательно, качества и эффективности полета.

Формулировка модели и допущения:

1. Малый БЛА роторного типа (дрон или квадрокоптер) оснащен светодиодным прожектором, который генерирует определенное количество тепла, а его система управления и регуляторы, а также периферийное оборудование (поисковый светодиодный прожектор, камера, датчики) преобразуют электрическую энергию в механическую или световую, вызывая нагрев; аккумуляторы выделяют тепло при разряде из-за внутреннего сопротивления.

2. Аккумулятор и светодиодный прожектор достаточно термически связаны, чтобы обеспечить передачу тепла без существенного воздействия на другие компоненты.

3. Окружающая температура переменна и может опускаться ниже оптимальной рабочей температуры аккумулятора.

4. Тепловые потери в окружающую среду в основном происходят за счет конвекции и излучения.

5. Эффективность аккумулятора и светодиодного света с точки зрения потребления энергии и выделения тепла известна.

6. Оптимальный диапазон рабочих температур для аккумулятора установлен в пределах от 5 до 20°C, и задача системы заключается в поддержании температуры аккумулятора в этих границах.

7. Решение о включении светодиодного прожектора принимается на основе анализа, сравнивающего энергопотребление для обогрева и потенциальные потери производительности из-за низкой температуры.

8. Модель включает алгоритм управления, который определяет режим работы на основе температур-



ных датчиков, связанных с аккумулятором и окружающей средой.

9. Предполагается, что в данной системе БЛА быстрые динамические изменения тепловых процессов не критичны, таким образом система достигает стационарного теплового состояния, где тепловые потоки постоянны во времени ( $dQ/dt = 0$ ).

10. Для того чтобы исключить сложные вычисления неоднородности теплопроводности, предполагается постоянство теплопроводности  $k$  и излучательной способности  $\varepsilon$  материалов ( $\nabla k = 0$  и  $\nabla \varepsilon = 0$ ).

11. Для упрощения дифференциальных уравнений предполагается линейная зависимость между тепловым потоком, обусловленным теплопроводностью, и градиентом температуры, то есть  $Q_{\text{конд}} \propto dT/dx$ .

12. Предполагается, что тепловые градиенты внутри компонентов незначительны или их влияние на общий тепловой баланс минимально ( $\nabla T_{\text{комп}} \approx 0$ ).

13. Алгоритм управления основан на данных с температурных датчиков, которые регистрируют как внутреннюю температуру аккумулятора, так и внешние условия эксплуатации. Решение о включении или выключении системы подогрева принимается на основе анализа энергопотребления и потерь от разряда аккумулятора в условиях пониженных температур.

14. Система управления решает задачу оптимизации, при которой выбирается один из двух режимов: а) режим подогрева аккумулятора активируется, если затраты на подогрев  $P_{\text{подогрев}}$  меньше, чем потери энергии от разряда аккумулятора при низких температурах  $P_{\text{разряд}}$ . Подогрев продолжается до достижения целевой температуры  $T_{\text{цель}}$ ; б) режим минимального потребления активируется, если расходы на подогрев выше  $P_{\text{разряд}}$ , система переводится в режим минимального освещения или выключения светодиодов для экономии энергии.

15. Для каждого временного шага  $t$  система вычисляется как

$$P_{\text{подогрев}}(t) = k_p \cdot (T_{\text{целевая}} - T_{\text{акб}}(t)); \quad (1)$$

$$P_{\text{разряд}}(t) = k_d \cdot (T_{\text{окр}} - T_{\text{акб}}(t)), \quad (2)$$

где  $P_{\text{подогрев}}(t)$  – мощность подогрева;

$P_{\text{разряд}}(t)$  – потери емкости батареи при низких температурах;

$T_{\text{целевая}}$  – целевая температура аккумулятора, °C;

$T_{\text{акб}}(t)$  – текущая температура аккумулятора в момент времени  $t$ , °C;

$T_{\text{окр}}$  – температура окружающей среды, °C;

$k_p$  – коэффициент подогрева, зависящий от характеристик аккумулятора, светодиодов и эффективности теплопередачи в системе;

$k_d$  – коэффициент разряда, зависящий от характеристик аккумулятора и влияния температуры окружающей среды на скорость разряда.

16. Система должна учитывать критическую температуру  $T_{\text{крит}}$ , ниже которой даже максимальные затраты на подогрев не смогут поднять температуру аккумулятора до целевого уровня. Этот порог определяется возможностями системы подогрева, её мощностью и потерями тепла.

Эффективность светодиодов ограничена физическими законами и технологическими ограничениями их производства. Тепловыделение в светодиодах критично для их работы, так как избыточное тепло может уменьшить эффективность и сократить срок службы.

Тепловыделение светодиода можно выразить через его электрическую мощность и эффективность преобразования, учитывая также коэффициенты, описывающие режим работы и интенсивность света:

$$Q_{\text{led}} = P_{\text{in}} \cdot (1 - \eta) \cdot M_{\text{реж}} \cdot I_{\text{led}}, \quad (3)$$

где  $Q_{\text{led}}$  – тепловыделение светодиода, Вт;

$P_{\text{in}}$  – электрическая мощность, подаваемая на светодиод, Вт;

$\eta$  – эффективность преобразования электрической энергии в свет, которая может варьироваться в зависимости от типа и качества светодиода, безразмерная величина;

$M_{\text{реж}}$  – коэффициент, описывающий режим работы светодиода (например, для постоянного режима работы при полной яркости  $M_{\text{реж}} = 1$ ,  $I_{\text{led}} = 1$ ; для мигающего режима с половиной времени активности и полной яркости  $M_{\text{реж}} = 0,5$ ,  $I_{\text{led}} = 1$ ; для постоянного режима с уменьшенной яркостью (например, 50%)  $M_{\text{реж}} = 1$ ,  $I_{\text{led}} = 0,5$ ), безразмерная величина;

$I_{\text{led}}$  – коэффициент, отражающий интенсивность света (от 0 до 1, где 1 соответствует максимальной яркости, а меньшие значения соответствуют уменьшенной яркости и, соответственно, меньшему тепловыделению), безразмерная величина.

Уравнение теплопроводности будет иметь вид

$$Q_{\text{конд}} = -k \cdot A \cdot dT/dx, \quad (4)$$

где  $Q_{\text{конд}}$  – теплопередача через материал, Вт;

$k$  – теплопроводность материала в зависимости от температуры  $T$ , Вт/м·К;

$A$  – площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>;

$dT/dx$  – температурный градиент, К/м.

Тогда уравнение конвекции будет иметь вид:

$$Q_{\text{конв}} = h_{(v, T_{\text{окр}}, RH)} \cdot A \cdot (T_{\text{пов}} - T_{\text{окр}}); \quad (5)$$

$$h_{(v, T_{\text{окр}}, \varphi)} = N_u \cdot k_{\text{возд}}(T_{\text{окр}}) / L; \quad (6)$$

$$N_u = C \cdot Re^{n_1} \cdot Pr^{n_2}, \quad (7)$$

где  $Q_{\text{конв}}$  – конвективный теплообмен, Вт;

$h_{(v, T_{\text{окр}}, \varphi)}$  – коэффициент конвективной теплоотдачи, зависящий от скорости воздушного потока  $v$ , температуры окружающей среды  $T_{\text{окр}}$  и относительной влажности  $\varphi$ , Вт/м·К;

$T_{\text{пов}}$  и  $T_{\text{окр}}$  – температуры поверхности светодиода и окружающей среды соответственно, К;

$k_{\text{возд}}(T_{\text{окр}})$  – теплопроводность воздуха при температуре окружающей среды, К;

$n_1$  и  $n_2$  в уравнении для числа Нуссельта  $N_u$  являются эмпирическими экспонентами, которые определяют, как изменение чисел Рейнольдса  $Re$  и Прандтля  $Pr$  влияет на конвективный теплообмен. Эти коэффициенты могут меняться в зависимости от геометрии системы, режима потока (ламинарный или турбулентный) и других факторов. Для ламинарного потока около объекта  $n_1$  часто принимается равным 0,5, а  $n_2$  – равным 0,33, что соответствует классической зависимости  $N_u \propto Re^{1/2} Pr^{1/3}$ ; для

турбулентного потока, значения  $n_1$  и  $n_2$  могут быть другими, например,  $n_1 = 0,8$  и  $n_2 = 0,4$ , отражая большее влияние турбулентности на теплообмен;

$L$  – характеристическая длина, то есть измерение объекта, которое имеет наибольшее влияние на конвективный теплообмен, м;

$C$  – предварительный множитель, который определяется эмпирически и может варьироваться в зависимости от конкретных условий и геометрии системы, безразмерная величина;

$N_u$  – число Нуссельта, для БЛА его значение может быть выше, чем для стационарных условий, из-за усиленной конвекции, вызванной движением, оно будет зависеть от конкретной геометрии БЛА и характеристик потока воздуха вокруг него, безразмерная величина;

$R_e$  – число Рейнольдса, в полете для БЛА может быть высоким из-за больших скоростей и размеров, что указывает на турбулентный режим потока, его значение будет зависеть от скорости полета, размеров БЛА и свойств окружающего воздуха, безразмерная величина,

$$R_e = v \cdot L / \mu, \quad (8)$$

где  $\mu$  – кинематическая вязкость воздуха,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$P_r$  – число Прандтля, для воздуха при нормальных условиях  $P_r$  остается около 0,7, но это значение может изменяться в зависимости от температуры и давления воздуха, особенно на больших высотах, безразмерная величина;

$v$  – скорость воздушного потока, для БЛА будет варьироваться в широком диапазоне в зависимости от скорости полета, может изменяться от низких значений при взлете и посадке до очень высоких при полете на максимальной скорости,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$\varphi$  – относительная влажность, в зависимости от погодных условий и высоты полета, относительная влажность окружающего воздуха может значительно варьироваться, важно учитывать, что на больших высотах воздух становится суше, %.

Температура окружающей среды изменяется с высотой по градиенту:

$$T_{\text{окр}}(H) = T_{\text{окр}}(0) - \gamma \cdot H, \quad (9)$$

где  $\gamma$  – температурный градиент (обычно около  $6,5^\circ\text{C}$  на  $1000$  м),  $\text{K}/\text{м}$ ;

$H$  – высота полета, м.

Радиационный теплообмен представляет собой передачу тепла путем теплового излучения. В таком случае уравнение радиационного теплообмена будет иметь вид

$$Q_{\text{рад}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_{\text{пов}}^4 - T_{\text{окр}}^4), \quad (10)$$

где  $Q_{\text{рад}}$  – количество тепла, передаваемое излучением, Вт;

$\varepsilon$  – излучательная способность материала, безразмерная величина;

$\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $\sigma \approx 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}^4)$ .

Уравнение взаимодействия с другими компонентами системы будет иметь вид:

$$Q_{\text{взаимодействия}} = \sum_i k_i \cdot A_i \cdot (T_{\text{led}} - T_{\text{компонента}_i}), \quad (11)$$

где  $Q_{\text{взаимодействия}}$  – тепловой поток, возникающий в результате этого взаимодействия, Вт;

$k_i$  – коэффициент теплопроводности между светодиодами и компонентом  $i$ ,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$ ;

$A_i$  – площадь контакта,  $\text{м}^2$ ;

$T_{\text{компонента}_i}$  – температура компонента  $i$ , К.

Для учета аэродинамического воздействия необходимо учесть составляющую изменения теплового потока в зависимости от скорости полета и изменений аэродинамического сопротивления:

$$Q_{\text{аэро}} = h_{\text{аэро}}(v, T_{\text{окр}}) \cdot A_{\text{пов. малого БЛА}} \cdot (T_{\text{пов. малого БЛА}} - T_{\text{окр}}), \quad (12)$$

где  $Q_{\text{аэро}}$  – тепловой поток, вызванный аэродинамическим воздействием, Вт;

$h_{\text{аэро}}(v, T_{\text{окр}})$  – аэродинамический коэффициент теплопередачи,  $[\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})]$ ;

$A_{\text{пов. малого БЛА}}$  – площадь поверхности малого БЛА,  $\text{м}^2$ ;

$T_{\text{пов. малого БЛА}}$  – температура поверхности малого БЛА, К.

Для учета нестационарных эффектов теплопередачи необходимо определить зависимость изменения теплового потока от времени:

$$Q_{\text{динамич}} = C_{\text{динамич}} \cdot dT_{\text{пов}}/dt, \quad (13)$$

где  $Q_{\text{динамич}}$  – тепловой поток, вызванный динамическими изменениями, Вт;

$C_{\text{динамич}}$  – теплоемкость системы, Дж/К;

$dT_{\text{пов}}/dt$  – скорость изменения температуры поверхности компонентов, которые участвуют в тепловом обмене с окружающей средой,  $\text{K}/\text{с}$ .

Теплопроводность материалов корпуса батареи малого БЛА:

$$Q_{\text{корпус}} = -k_{\text{корпус}} \cdot A_{\text{корпус}} \cdot dT_{\text{корпус}}/dx, \quad (14)$$

где  $Q_{\text{корпус}}$  – теплопередача через материал корпуса, Вт;

$k_{\text{корпус}}$  – теплопроводность материала корпуса,  $[\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})]$ ;

$A_{\text{корпус}}$  – площадь поперечного сечения корпуса,  $\text{м}^2$ ;

$dT_{\text{корпус}}/dx$  – температурный градиент в корпусе,  $\text{K}/\text{м}$ .

Для каждого элемента можно определить тепловой вклад следующим образом:

$$Q_{\text{сум}} = \sum_i Q_i, \quad (15)$$

где  $Q_i$  – тепловой вклад отдельного элемента, Вт·с.

$$Q_i = P_i \cdot t, \quad (16)$$

где  $P_i$  – потребляемая мощность элемента, Вт;

$t$  – время работы, с.

Коэффициент конвективной теплоотдачи:

$$h_{\text{конв}}(v, T_{\text{окр}}) = C_p \cdot v^n \cdot f(T_{\text{окр}}), \quad (17)$$

где  $C_p$  – эмпирический коэффициент, зависящий от формы и размера малого БЛА,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ ;

$n$  – степень зависимости коэффициента конвективной теплоотдачи от скорости воздушного потока, безразмерная величина,  $C_p$  и  $n$  будут зависеть от формы, размера малого БЛА и расположения элементов, которые нужно охладить;

$f(T_{\text{окр}})$  – функция, учитывающая изменение свойств воздуха (плотность, вязкость) с температурой окружающей среды.

Дополнительный нагрев от светодиодов

$$Q_{led} = I_{led} \cdot (1 - \eta) \cdot P_{in}, \quad (18)$$

где  $Q_{led}$  – тепловыделение светодиода, Вт;  
 $I_{led}$  – интенсивность свечения светодиода, которая влияет на его тепловыделение, безразмерная величина;  
 $P_{in}$  – мощность, потребляемая светодиодом, Вт.

Охлаждение поверхности прожектора воздушным потоком

$$Q_{охл\_led} = h_{конв(v, T_{окр})} \cdot A_{led} \cdot (T_{led} - T_{окр}), \quad (19)$$

где  $A_{led}$  – площадь поверхности светодиода, участвующая в теплообмене, м<sup>2</sup>;  
 $T_{led}$  – температура поверхности светодиода, К.

Аэродинамическая сила сопротивления может рассчитываться следующим образом:

$$F_{aэр} = 1/2 \cdot C_d \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_{лоб}, \quad (20)$$

где  $C_d$  – коэффициент аэродинамического сопротивления, безразмерная величина;  
 $\rho$  – плотность воздуха, зависящая от высоты полета, кг/м<sup>3</sup>;  
 $A_{лоб}$  – лобовая площадь БЛА, м<sup>2</sup>.

Тепловые потери из-за аэродинамического сопротивления

$$Q_{aэр} = F_{aэр} \cdot v. \quad (21)$$

Эффективность и емкость батареи зависят от состояния заряда (SOC) и состояния батареи (принятое сокращение «SOH» – от англ. state of health):

$$C_{бат\_эфф} = C_{ном\_бат} \cdot SOH \cdot SOC, \quad (22)$$

где  $C_{бат\_эфф}$  – эффективная емкость батареи, А·ч;  
 $C_{ном\_бат}$  – номинальная емкость батареи, А·ч;  
 $SOH$  (state of health) – относительное состояние «здоровья» батареи, в процентах от нового состояния, то есть на сколько деградировали химические элементы батареи;  
 $SOC$  (state of charge) – начальное состояние заряда в долях от полной емкости (в долях или процентах).

Импеданс батареи увеличивается при понижении температуры и по мере старения батареи [15, 16]. Импеданс  $Z$  можно смоделировать как функцию температуры  $T$  и состояния здоровья батареи  $SOH$ :

$$Z = Z_0 \cdot f(T, SOH), \quad (23)$$

где  $Z_0$  – номинальный импеданс при стандартных условиях, Ом;  
 $f(T, SOH)$  – функция, описывающая изменение импеданса в зависимости от температуры и состояния батареи.

Типовая функция для  $f(T, SOH)$ :

$$f(T, SOH) = a \cdot e^{-b \cdot T} \cdot (1 + c \cdot (1 - SOH)), \quad (24)$$

где  $a$  – базовый коэффициент масштабирования импеданса, безразмерная величина;  
 $b$  – коэффициент чувствительности импеданса к температуре, 1/К;  
 $c$  – коэффициент влияния деградации на импеданс, безразмерная величина.

Эмпирические коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $c$  определяются путем экспериментальных измерений и подбираются в соответствии с наблюдаемым поведением конкретных химических элементов батареи в различных условиях. Коэффициент  $a$  определяет базовое масштабирование импеданса. На него в первую очередь влияют свойства материала и конструкция батареи,  $a$  регулирует, как импеданс начинается с номинального значения  $Z_0$  при эталонной температуре и состоянии здоровья. Он соответствует импедансу по размеру. Коэффициент  $b$  определяет влияние чувствительности импеданса к изменениям температуры. Обычно это положительное значение, отражающее экспоненциальное увеличение импеданса при снижении температуры,  $b$  выражается в единицах, обратных температуре (например, 1/°C), чтобы отразить, насколько быстро импеданс увеличивается при снижении температуры. Коэффициент  $c$  определяет влияние деградации на импеданс из-за ухудшения состояния батареи. По мере старения батареи и ухудшения ее состояния  $c$  определяет дополнительное увеличение импеданса. Он является безразмерным и изменяет импеданс пропорционально отклонению SOH от 100%.

При разряде или заряде аккумулятора выделяется тепло из-за его внутреннего сопротивления, которое определяется уравнением

$$Q_{акб} = I^2 \cdot Z \cdot t, \quad (25)$$

где  $Q_{акб}$  – тепло, выделяемое внутренним сопротивлением, Вт·с;

$I$  – ток, А;

$Z$  – импеданс батареи, Ом;

$t$  – время, с.

Для динамического моделирования системы сформулируем дифференциальное уравнение для температуры батареи  $T_{бат}$  с учетом всех источников тепла и потерь:

$$\frac{dT_{бат}}{dt} = (Q_{led} + Q_{акб} + Q_{aэр} + Q_{динамич} + Q_{корпуса} - Q_{конв} - Q_{рад} - Q_{взаимодействия}) / m_{бат} \cdot c_{бат}, \quad (26)$$

где  $dT_{бат}/dt$  – скорость изменения температуры батареи, К/с;

$m_{бат}$  – масса батареи, кг;

$c_{бат}$  – удельная теплоемкость батареи, Дж/(кг·К).

Для определения, когда выгодно включать подогрев, определяем целевую функцию, которая должна минимизировать суммарные энергозатраты с учетом потерь:

$$\min \left( \int_0^{t_{работ}} [P_{подогрев}(t) + P_{свет}(t) + Q_{конв}(t) + Q_{aэр}(t)] dt \right), \quad (27)$$

где  $P_{подогрев}(t)$  – мощность подогрева в момент времени  $t$ , Вт;

$P_{свет}(t)$  – мощность освещения светодиодами в момент времени  $t$ , Вт;

$Q_{конв}(t)$  – конвективные теплопотери в момент времени  $t$ , Вт;

$Q_{aэр}(t)$  – теплопотери от аэродинамического сопротивления в момент времени  $t$ , Вт;

$t_{работ}$  – время работы системы, с.

На каждом временном шаге  $t$ :

1) рассчитываются конвективные  $Q_{\text{конв}}(t)$  и аэродинамические  $Q_{\text{аэр}}(t)$  теплопотери;

2) определяются текущие потери аккумулятора  $P_{\text{разряд}}(t)$ ;

3) сравниваются суммарные затраты на подогрев и теплопотери: если  $P_{\text{подогрев}}(t) < P_{\text{разряд}}(t)$ , включается подогрев; если  $P_{\text{подогрев}}(t) > P_{\text{разряд}}(t)$ , система отключает подогрев.

Дифференциальное уравнение для температуры аккумулятора

$$dT_{\text{бат}}/dt = (Q_{\text{led}} + Q_{\text{акб}} + Q_{\text{аэр}} + Q_{\text{динамич}} + Q_{\text{корпуса}} - Q_{\text{конв}} - Q_{\text{рад}} - Q_{\text{взаимодействия}})/(m_{\text{бат}} \cdot c_{\text{бат}}), \quad (28)$$

где  $dT_{\text{бат}}/dt$  – скорость изменения температуры батареи, К/с;

$Q_{\text{led}}$  – тепловыделение от светодиодов, Вт;

$Q_{\text{акб}}$  – тепловыделение от аккумулятора, Вт;

$Q_{\text{аэр}}$  – тепловые потери от аэродинамического сопротивления, Вт;

$Q_{\text{динамич}}$  – динамические изменения теплотока, Вт;

$Q_{\text{корпуса}}$  – теплопередача через материал корпуса, Вт;

$Q_{\text{конв}}$  – конвективные теплопотери, Вт;

$Q_{\text{рад}}$  – тепловые потери через излучение, Вт;

$Q_{\text{взаимодействия}}$  – теплопередача между компонентами, Вт;

$m_{\text{бат}}$  – масса батареи, кг;

$c_{\text{бат}}$  – удельная теплоемкость батареи, Дж/(кг·К).

### Полученные результаты и их обсуждение

Симуляционное моделирование и численное решение разработанной модели производилось на языке Python с использованием Jupiter Notebook. Было принято, что основным элементом системы является малый БЛА квадрокоптерного типа, оснащенный светодиодным прожектором, термически связанным с аккумуляторной батареей. Светодиодный прожектор используется как источник света и при необходимости как источник тепла для подогрева аккумуляторной батареи. Мощность светодиодов составляет 40 Вт, эффективность света 20%, то есть приблизительно 80% энергии преобразуется в тепло. В качестве аккумуляторной батареи принята литий-ионная батарея с номинальной энергией 65 Вт·ч и напряжением 15,4 В. Батарея имеет массу 0,375 кг и удельную теплоемкость 800 Дж/(кг·К). Моделирование проводилось при температурах окружающей среды -10, -5, 0, 5, -20, -30°C. Было принято, что БЛА эксплуатировался на высоте 3000 м (взлет и снижение не учитываются, поддержание высоты было принято постоянным на весь период моделирования), что соответствует снижению температуры на 19,5°C (6,5°C на каждую 1000 м высоты). Скорость воздушного потока вокруг малого БЛА была принята постоянной и установлена на уровне 15 м/с, что соответствует средней скорости полета малого БЛА.

Коэффициенты теплопроводности ( $k = 0,04$  Вт/(м·К)) и излучательной способности ( $\varepsilon = 0,95$ ) материалов корпуса и аккумулятора принимались по-

стоянными. Допускалось, что система достигает стационарного теплового состояния, где тепловые потоки постоянны во времени, при этом уравнение теплопередачи через материал учитывает постоянную теплопроводность и линейную зависимость теплового потока от температурного градиента.

Уравнение конвективного теплообмена учитывает коэффициент конвективной теплоотдачи, который рассчитывается исходя из скорости воздушного потока и температуры окружающей среды.

Уравнение радиационного теплообмена учитывает излучательную способность материала и постоянную Стефана-Больцмана.

Полученные данные симуляционного моделирования позволяют оптимизировать режимы подогрева аккумуляторных батарей БЛА в зависимости от температурных условий, что способствует повышению стабильности и надежности работы системы электропитания. Данная оптимизация является важным элементом стандартизации качества функционирования БЛА в широком диапазоне температур окружающей среды.

Для выполнения моделирования были использованы входные данные, представленные в **табл. 1**.

Таблица 1. Принятые входные параметры численного решения модели

Table 1. The input parameters adopted for the numerical solution of the model

Параметр	Единица измерения	Значение
Энергия аккумулятора	Вт·ч	65
Время полета	с	2760
Напряжение аккумулятора	В	15,4
Эффективность светодиода	безразмерная величина	0,20
Мощность светодиодов	Вт	40
Температура окружающей среды на уровне земли	°C	-10, -5, 0, 5, -30, -20
Скорость воздушного потока	м/с	15
Коэффициент теплопроводности	Вт/(м·К)	0,04
Площадь контакта	м²	0,1
Длина материала	м	0,01
Излучательная способность	безразмерная величина	0,95
Масса аккумулятора	кг	0,375
Удельная теплоемкость	Дж/(кг·К)	800
Температурный градиент	К/1000 м	6,5
Высота полета	м	3000

Для симуляции модели использовались экспериментальные данные о времени разряда аккумулятора при различных температурах. В **табл. 2** представлены исходные данные разряда аккумулятора без подогрева и результаты моделирования времени разряда с подогревом. Эффективность нагрева согласно результатам симуляционного моделирования составила 0,263 К/с.

Основные результаты моделирования представлены в **табл. 3** и на **рис. 1, 2**.



Таблица 2. Исходные (полученные экспериментальным путем) данные разряда аккумулятора без подогрева и результаты моделирования времени разряда с подогревом

Table 2. Experimental data on battery discharge without heating and the simulated results of discharge time with heating

Температура, °C	Время разряда без подогрева, с	Время разряда с подогревом, с
-15	3872,76	3930,40
-10	4214,27	4264,77
0	4763,54	4799,78
10	5134,46	5156,43
20	5327,04	5334,74
30	5341,27	5334,70
40	5177,16	5156,33
50	4834,70	4799,60

Таблица 3. Результаты симуляционного моделирования о полученной температуре аккумулятора и выигрыше в повышении длительности разряда

Table 3. Simulation results on the achieved battery temperature and the gain in discharge duration

Температура на уровне земли, °C	Температура на высоте 3000 м, °C	Конечная температура без подогрева, °C	Конечная температура с подогревом, °C	Увеличение длительности разряда, с
-30	-49,5	-22,05	24,22	57,64
-20	-39,5	-15,77	8,73	50,50
-10	-29,5	-8,05	6,59	50,50
-5	-24,5	-3,74	14,08	57,64
0	-19,5	0,80	5,31	36,24
5	-14,5	5,50	5,50	0,00

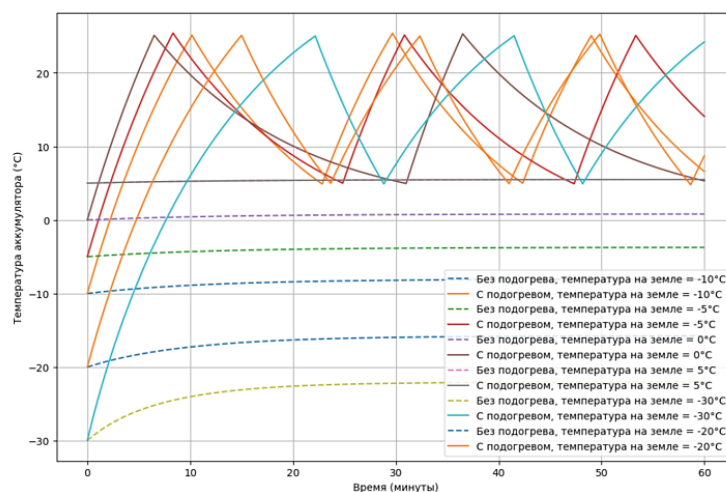


Рис. 1. Сравнение изменений температуры аккумулятора в зависимости от окружающей температуры с включением подогрева и без него

Fig. 1. Comparison of battery temperature changes depending on the ambient temperature with and without heating

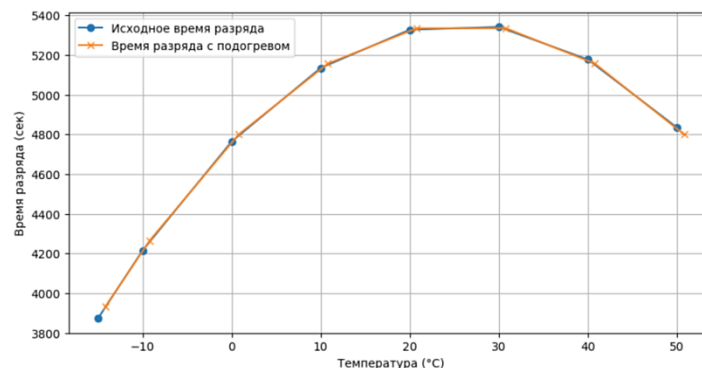


Рис. 2. Влияние нагрева на время разряда аккумулятора

Fig. 2. The impact of heating on battery discharge time

### Заключение

Разработанная иммитационная модель управления подогревом аккумулятора малых БЛА демонстрирует значительный потенциал для улучшения их эксплуатационных характеристик в условиях низких температур. В процессе моделирования было установлено, что использование светодиодных источников света в качестве комбинированных источников света и тепла позволяет поддерживать оптимальную рабочую температуру аккумуляторной батареи, что, в свою очередь, приводит к увеличению времени автономной работы устройства.

Особенно примечательными являются результаты моделирования при температуре окружающей среды  $-15^{\circ}\text{C}$ . В этих условиях время разряда аккумулятора с подогревом увеличилось с 3872,76 до 3930,40 с, что составляет прирост на 57,64 с. Хотя этот прирост времени может показаться незначительным, он имеет критическое значение в ситуациях, требующих длительной автономной работы малых БЛА, особенно в условиях, где температура окружающей среды отрицательно сказывается на эффективности аккумуляторов.

Эти данные свидетельствуют о том, что предложенная модель может существенно расширить возможности применения малых БЛА в различных климатических зонах, включая регионы с умеренно холодными зимами. Кроме того, поддержание оптимальной температуры аккумуляторов с помощью светодиодов способствует повышению энергоэффективности системы и улучшению общей надежности работы малых БЛА.

Интеграция светодиодных систем в качестве комбинированного активного источника света и элемента подогрева аккумулятора не только позволяет оптимизировать энергопотребление, но и открывает новые перспективы для улучшения взаимодействия с другими бортовыми системами, такими как системы навигации и управления. Это может привести к значительному повышению общей функциональности и безопасности эксплуатации малых БЛА.

Модель учитывает ключевые параметры теплопередачи, включая теплоемкость материалов, коэффициенты теплопроводности, конвекции и излучения, а также аэродинамическое воздействие. Это позволяет обеспечить высокую точность расчетов и адаптивность модели к различным условиям эксплуатации. В результате предложенная модель управления подогревом аккумулятора представляет собой значительный шаг вперед в направлении повышения эффективности и надежности малых БЛА, особенно в условиях эксплуатации при умеренно низких температурах.

Таким образом, управление тепловыми характеристиками аккумулятора и светодиодных систем рассматривается как элемент повышения качества и надежности функционирования БЛА, что напрямую относится к управлению качеством продукции. Оптимизация управления подогревом выполнена с учетом задач обеспечения стандартизированных условий эксплуатации. Это позволяет рассматривать модель в контексте управления качеством и стандартизации, так как она позволяет обеспечивать согласованные критерии температурных режимов, а следовательно, и энергозатрат.

Практическое значение данного исследования заключается в возможности повышения надежности и продолжительности работы малых БЛА в сложных климатических условиях. Это открывает новые возможности для расширения их применения в таких областях, как мониторинг, разведка и доставка в регионы с умеренно холодным климатом. Внедрение предложенной модели в эксплуатацию малых БЛА может существенно повысить их конкурентоспособность и обеспечить более широкое использование в различных отраслях.

Разработанная модель управления подогревом аккумуляторов позволяет поддерживать температурный режим батареи, что позволяет влиять на качество функционирования малых БЛА в условиях умеренно холодного климата. Это, в свою очередь, улучшает эксплуатационные характеристики аппарата, повышая его надежность и соответствие стандартам качества, предъявляемым к таким системам.

### Список источников

1. Pollock A., Pollock H., Pollock C. High Efficiency LED Power Supply // *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2015, vol. 3, pp. 617-623. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2015.2430621>.
2. Highly efficient near-UV-excitable  $\text{Ca}_2\text{YHf}_2\text{Al}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+},\text{Tb}^{3+}$  green-emitting garnet phosphors with potential application in high color rendering warm-white LEDs / Wang S., Devakumar B., Sun Q., Liang J., Sun L., Huang X. // *Journal of Materials Chemistry C*. 2020, no. 8, pp. 4408-4420. <https://doi.org/10.1039/d0tc00130a>.
3. An Ultrahigh Efficiency Excitonic Micro-LED / Pandey A., Min J., Reddeppa M., Malhotra Y., Xiao Y., Wu Y., Sun K., Mi Z. // *Nano letters*. 2023. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c04220>
4. Yan C., Bai S., Nie T. Wang. High-power high-efficiency green LEDs // 12th China International Forum on Solid State Lighting (SSLCHINA). 2015, pp. 1-3. <https://doi.org/10.1109/SSLCHINA.2015.7360676>.
5. Very high external quantum efficiency and wall-plug efficiency 527 nm InGaN green LEDs by MOCVD / Li P., Zhao Y., Li H., Che J., Zhang Z., Li Z., Zhang Y., Wang L., Liang M., Yi X., Wang G. // *Optics express*. 2018, 26(25), 33108-33115. <https://doi.org/10.1364/OE.26.033108>.
6. High wall-plug efficiency blue III-nitride LEDs designed for low current density operation / Kuritzky L., Espenlaub A., Yonkee B., Pynn C., Denbaars S., Nakamura S., Weisbuch C., Speck J. // *Optics express*. 2017, 25(24), 30696-30707.
7. Кузьменко В.П. Применение алгоритма адаптивной многоимпульсной позиционной модуляции для повышения качества связи в области видимого света при управлении светодиодным освещением // *Наука и бизнес: пути развития*. 2022. № 7 (133). С. 54-58.
8. Rangappa N., Prasad Y., Dubey S. LEDNet: Deep Learning-Based Ground Sensor Data Monitoring System // *IEEE Sensors Journal*. 2022, no. 22, pp. 842-850. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3129173>.
9. 3-D Deployment of VLC Enabled UAV Networks With Energy and User Mobility Awareness / Anwar D., Peer M., Lata K., Srivastava A., Bohara V. // *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*. 2022, no. 6, pp. 1972-1989. <https://doi.org/10.1109/TGCN.2022.3171920>.

10. Тыныбаев С.К., Байсеитов Г.Н., Тойбазаров Д.О. Оценка и выбор источников питания беспилотных летательных аппаратов // *E-Scio*. 2020. №4 (43).
11. Холкин Д., Чаусов И., Шуранова А. Энергетика беспилотных авиационных систем // *Энергетическая политика*. 2023. № 8 (187). С. 26-37. DOI: 10.46920/2409-5516\_2023\_8186\_26.
12. Impact of low temperature and charge profile on the aging of lithium-ion battery: Non-invasive and post-mortem analysis / Wu W., Ma R., Liu J., Liu M., Wang W., Wang Q. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021, 170, 121024. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2021.121024>.
13. Lithium-ion battery structure that self-heats at low temperatures / Wang C., Zhang G., Ge S., Xu T., Ji Y., Yang X., Leng Y. // *Nature*, 2016, no. 529, pp. 515-518. <https://doi.org/10.1038/nature16502>.
14. Bandhauer T., Garimella S., Fuller T. A Critical Review of Thermal Issues in Lithium-Ion Batteries // *Journal of The Electrochemical Society*, 2011, 158. <https://doi.org/10.1149/1.3515880>.
15. Шамарова Н.А. Анализ методов оценки уровня заряда аккумуляторных батарей // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2022. Т.14. № 1 (53). С. 24-33.
16. Сердечный Д.В., Томашевский Ю.Б. Особенности эксплуатации накопителя энергии на базе многоэлементной литий-ионной аккумуляторной батареи // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2017. Т. 19. № 9-10. С. 140-145.
- InGaN green LEDs by MOCVD. *Optics express*, 2023;26(25):33108-33115. <https://doi.org/10.1364/OE.26.033108>.
6. Kuritzky L., Espenlaub A., Yonkee B., Pynn C., Denbaars S., Nakamura S., Weisbuch C., Speck, J. High wall-plug efficiency blue III-nitride LEDs designed for low current density operation. *Optics express*, 2017;25(24):30696-30707.
7. Kuzmenko V.P. Application of adaptive multi-pulse position modulation algorithm to improve communication quality in the visible light range when controlling LED lighting. *Nauka i biznes: puti razvitiya* [Science and business: ways of development.], 2022;7(133):54-58. (In Russ.)
8. Rangappa N., Prasad Y., Dubey S. LEDNet: Deep Learning-Based Ground Sensor Data Monitoring System. *IEEE Sensors Journal*, 2022;22:842-850. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3129173>.
9. Anwar D., Peer M., Lata K., Srivastava A., Bohara V. 3-D Deployment of VLC Enabled UAV Networks With Energy and User Mobility Awareness. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2022;(6):1972-1989. <https://doi.org/10.1109/TGCN.2022.3171920>.
10. Tynybaev S.K., Bayseitov G.N., Toybazarov, D.O. Assessment and selection of power sources for unmanned aerial vehicles. *E-Scio*, 2020;4(43). (In Russ.)
11. Kholkin D., Chaurov I., Shuranova A. Energy of unmanned aerial systems. *Energeticheskaya politika*, [Energy policy], 2023;8(187):26-37. DOI: 10.46920/2409-5516\_2023\_8186\_26. (In Russ.)
12. Wu W., Ma R., Liu J., Liu M., Wang W., Wang Q. Impact of low temperature and charge profile on the aging of lithium-ion battery: Non-invasive and post-mortem analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021;170:121024. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2021.121024>.
13. Wang C., Zhang G., Ge S., Xu T., Ji Y., Yang X., Leng Y. Lithium-ion battery structure that self-heats at low temperatures. *Nature*, 2016;529:515-518. <https://doi.org/10.1038/nature16502>.
14. Bandhauer T., Garimella S., Fuller T. A Critical Review of Thermal Issues in Lithium-Ion Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 2011;158. <https://doi.org/10.1149/1.3515880>.
15. Shamarova N.A. Analysis of methods for assessing the charge level of rechargeable batteries. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Vestnik of Kazan State Power Engineering University], 2022;14(1(53)): 24-33. (In Russ.)
16. Serdechnyy D.V., Tomashevskiy Yu.B. Features of operation of an energy storage based on a multi-element lithium-ion battery. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki* [Power engineering: research, equipment, technology], 2017;19(9-10):140-145. (In Russ.)

## References

1. Pollock A., Pollock H., Pollock C. High Efficiency LED Power Supply. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2015;3:617-623. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2015.2430621>.
2. Wang S., Devakumar B., Sun Q., Liang J., Sun L., Huang, X. Highly efficient near-UV-excitable  $\text{Ca}_2\text{YHf}_2\text{Al}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$  green-emitting garnet phosphors with potential application in high color rendering warm-white LEDs. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020;8:4408-4420. <https://doi.org/10.1039/d0tc00130a>.
3. Pandey A., Min J., Reddeppa M., Malhotra Y., Xiao Y., Wu Y., Sun K., Mi Z. An Ultrahigh Efficiency Excitonic Micro-LED. *Nano letters*. (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c04220>
4. Yan C., Bai S., Nie T. Wang. High-power high-efficiency green LEDs. 12th China International Forum on Solid State Lighting (SSLCHINA), 2015:1-3. <https://doi.org/10.1109/SSLCHINA.2015.7360676>.
5. Li P., Zhao Y., Li H., Che J., Zhang Z., Li Z., Zhang Y., Wang L., Liang M., Yi X., Wang G. x Very high external quantum efficiency and wall-plug efficiency 527 nm

Поступила 16.08.2024; принята к публикации 10.10.2024; опубликована 30.06.2025  
Submitted 16/08/2024; revised 10/10/2024; published 30/06/2025

**Кузьменко Владимир Павлович** – кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия.  
Email: mr.konnny@gmail.com. ORCID 0000-0002-0270-4875

**Vladimir P. Kuzmenko** – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Electromechanics and Robotics, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia.  
Email: mr.konnny@gmail.com. ORCID 0000-0002-0270-4875

# ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ

## ECONOMICS, MANAGEMENT AND PRODUCT MARKET

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 658.512.26:338.5  
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-188-200



### ЭКСПРЕСС-МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СЛОЖНОСТИ НОВЫХ РАЗРАБОТОК НА ОСНОВЕ ПРОЕКТОВ-АНАЛОГОВ

Щеглов Д.К.<sup>1</sup>, Щеглов К.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Северо-Западный региональный центр Концерна ВКО «Алмаз – Антей» – Обуховский завод», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** В общепринятых методиках проведения технико-экономического обоснования исследований и разработок в области машиностроения сложность проектов, как правило, учитывается эмпирическими коэффициентами, которые не имеют строгого научно-теоретического обоснования. Таким образом, актуальной является задача совершенствования существующих методов организации производства в направлении повышения точности оценки сложности перспективных проектов, что в будущем позволит более точно оценить трудоемкость и сроки их реализации. **Цель работы.** Целью работы является разработка научно-методического инструментария для оценивания сложности новых разработок на основе информации о проектах-аналогах. **Используемые методы.** Экспресс-методика базируется на методах системного анализа, экспертного анализа, непараметрической статистики, а также методических рекомендациях Минтруда России по нормированию труда при выполнении НИОКР. **Новизна.** Предложена единая методика, позволяющая оценивать сложность проведения различных проектов в области машиностроения, а именно научно-исследовательских, проектно-конструкторских и производственно-технологических. **Результат.** Предлагается формализованный подход к анализу сложности новых разработок на основе проектов-аналогов (прототипов). Представлена система показателей для предпроектной оценки сложности новых исследований и разработок. Предложены допустимые числовые значения этих показателей для исследований и разработок, реализующихся в области специального машиностроения. **Практическая значимость.** Предлагаемая экспресс-методика позволяет оценить сложность машиностроительного проекта с целью принятия результативных организационно-технических решений, а также дальнейшего технико-экономического обоснования проведения исследований и разработок.

**Ключевые слова:** оценка сложности, проектно-конструкторские работы, НИОКР, метод аналогов, подход к анализу, коэффициент сложности

© Щеглов Д.К., Щеглов К.Н., 2025

#### Для цитирования

Щеглов Д.К., Щеглов К.Н. Экспресс-методика оценки сложности новых разработок на основе проектов-аналогов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 188-200. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-188-200>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



# EXPRESS METHOD FOR ASSESSING THE COMPLEXITY OF NEW DEVELOPMENTS BASED ON ANALOG PROJECTS

Shcheglov D.K.<sup>1</sup>, Shcheglov K.N.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> JSC North Western Regional Center of Almaz Antey Concern Obukhovsky Plant, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> FSBEI HE Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, St. Petersburg, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** In commonly accepted methods for conducting feasibility studies in the field of mechanical engineering, the complexity of projects is typically accounted for using empirical coefficients that lack strict scientific and theoretical justification. Therefore, there is a pressing need to improve existing methods of production organization to enhance the accuracy of complexity assessments for future projects, which, in turn, will enable more precise estimates of labor intensity and project timelines. **Objectives.** The objective of this work is to develop a scientific and methodological toolkit for assessing the complexity of new developments based on information from analogous projects. **Methods Applied.** The express methodology is based on methods of systems analysis, expert analysis, non-parametric statistics, as well as the methodological recommendations of the Ministry of Labor of Russia for labor standardization in the execution of research and development (R&D) projects. **Originality.** A unified methodology is proposed that allows for the assessment of the complexity of various projects in the field of mechanical engineering, specifically research, design, and production-technology projects. **Result.** A formalized approach is proposed for analyzing the complexity of new developments based on analogous (prototype) projects. A system of indicators for the preliminary assessment of the complexity of new research and development projects is presented. Acceptable numerical values for these indicators are suggested for research and development in the field of specialized mechanical engineering. **Practical Relevance.** The proposed express methodology allows for the assessment of the complexity of a mechanical engineering project to support effective organizational and technical decision-making, as well as further feasibility studies for research and development.

**Keywords:** complexity assessment, design and engineering work, R&D, analog method, analysis approach, complexity coefficient

## For citation

Shcheglov D.K., Shcheglov K.N. Express Method for Assessing the Complexity of New Developments Based on Analog Projects. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 188-200. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-188-200>

## Введение

Понимание сложности выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) на этапе их планирования является одним из ключевых показателей качества организации процессов разработки и производства высокотехнологичной продукции [1]. Качество производственного планирования характеризуется точностью определения объема ресурсов (сроки, бюджет, специалисты), требующихся для реализации перспективных проектов [2].

Адекватная оценка сложности выполнения новых проектов на этапе их планирования не только позволяет лучше подготовиться к возможным трудностям, но и предоставляет возможность выявить и минимизировать потенциальные организационные и технические риски. Это дает возможность разработать стратегии, а также предупреждающие и корректирующие действия для предотвращения или минимизации проектных рисков. Кроме того, предприятия и организации, способные точно оценивать риски проектов и эффективно управлять ими, обладают конкурентным преимуществом [3]. Такие организации могут предла-

гать более конкурентоспособные продукты и услуги в требуемые сроки, что способствует укреплению их позиций на рынке высокотехнологичной продукции.

В настоящее время отсутствует единая стандартизированная методика оценки сложности выполнения НИОКР (проектов), что требует от каждой организации разработки собственных подходов [4]. Это может затруднить сравнение аналогичных результатов НИОКР, выполняемых различными организациями, однако такая гибкость также дает возможность адаптировать методику под потребности и особенности проектов конкретной проектной организации или предприятия. Следует отметить, что применительно к проектным организациям сложность разрабатываемого изделия не является прямо пропорциональной сложности разработки проекта [3, 4]. Прежде всего, это обусловлено различием в опыте разработки определенных видов изделий различными проектными командами, то есть проект по разработке изделия может иметь разную сложность для различных организаций.

Сложность разрабатываемых изделий и/или проектов зависит от множества факторов, начиная от технических требований и уровня инноваций и за-

канчивая степенью интеграции результатов исследований и разработок с уже созданными техническими системами. При этом сбор данных о ранее разработанных изделиях и/или выполненных проектах может столкнуться с неоднородностью и неполнотой информации, что создает дополнительные трудности в процессе оценивания сложности.

Анализ сложности новых разработок также подвержен субъективным оценкам, поскольку различные участники процесса оценивания (эксперты) могут иметь разные точки зрения на то, что делает разрабатываемое проект и/или изделие сложным.

Таким образом, необходимость повышения точности и обоснованности оценки трудоемкости НИОКР выдвигает на первый план задачу разработки формализованных подходов к оцениванию сложности, которые учитывали бы широкий спектр факторов и мнения различных заинтересованных сторон [5].

### Формализованный подход к оцениванию сложности новых разработок

Введем допущение, что с точки зрения отдельно рассматриваемой организации сложность изделия тождественно равна сложности проекта по его разработке. С учетом введенного допущения далее будет использоваться понятие «сложность проекта».

Одним из наиболее распространенных подходов к оцениванию сложности новых проектов является анализ проектов-аналогов (прототипов), при котором сложность нового проекта определяется на основе анализа и сравнения с уже существующими аналогичными проектами [6]. Этот подход основывается на предположении, что изделия, имеющие сходные характеристики или функциональное назначение, будут иметь схожую сложность в процессе разработки и производства.

На рис. 1 приведен пример формализованного описания процесса оценивания сложности нового проекта на основе проектов-аналогов в виде контекстной функциональной модели IDEF0 (диаграммы уровня A1) с «точки зрения» лица, принимающего решение о возможности (целесообразности) выполнения НИОКР. Функциональная модель построена в соответствии с рекомендациями по стандартизации Р 50.1.028-2001 [7].

Как видно из анализа рис. 1, процесс оценивания сложности проекта на основе проектов-аналогов включает следующие подпроцессы:

- Идентификация аналогов. Сначала необходимо определить уже существующие проекты-аналоги, которые имеют схожие технические или функциональные характеристики с разрабатываемым изделием или технологией.

- Сбор данных. После того как аналоги были определены, следует реализовать самый сложный этап – провести сбор данных о том, какие ресурсы (люди, время, материалы, технологии) были затрачены на реализацию проектов-аналогов (разработку и производство этих изделий).

- Сопоставление характеристик. Проведение сравнительного анализа между рассматриваемыми проектами-аналогами для выявления сходств и различий в структуре проектов, технических характеристиках разрабатываемых изделий, а также объема требуемых работ с применением действующей в организации методики экспертной оценки. При этом методика может включать в себя сопоставление потребных (затраченных) ресурсов, времени (трудоемкости), необходимых для достижения целевых результатов при разработке изделия или технологии.



Рис. 1. Процесс оценивания сложности проекта на основе проектов-аналогов  
Fig. 1. The process of assessing project complexity based on analogous projects

– Обработка результатов анализа. После завершения экспертами процедуры сравнения нового проекта с проектами-аналогами необходимо обработать результаты анализа для формирования коэффициента сложности проекта (переводного коэффициента).

Следует отметить, что с целью принятия обоснованных управленческих решений при планировании НИОКР могут применяться технологии анализа больших данных [8].

Анализ данных позволяет прогнозировать сроки выполнения проектов, автоматизировать процесс планирования с учетом различных переменных и ограничений, оптимизировать распределение ресурсов и повышать точность бюджетирования. При этом наличие детальных данных по выполненным проектам позволяет повысить точность оценки сложности перспективных проектов.

На рис. 2 представлен пример зависимости продолжительности (длительности) выполнения проектно-конструкторских работ от объема выпущенной в рамках проекта технической документации.

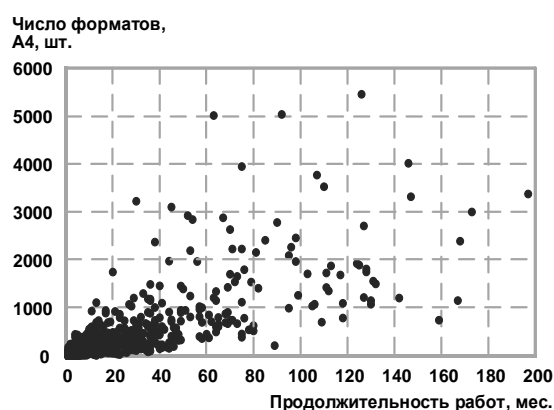


Рис. 2. Объем выпущенной проектно-конструкторской документации по реализованным проектам в зависимости от длительности разработки  
Fig. 2. The volume of issued design and engineering documentation for implemented projects depending on the duration of development

Анализ рис. 2 показывает, что наличие информации о выполненных проектах позволяет выбрать проект-аналог, характеризующийся длительностью выполнения перспективных проектно-конструкторских работ, объемом технической документации по изделию и другими ключевыми показателями.

Для изделий вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) трудоемкость разработки напрямую связана с видами (типами) и объемом технической документации по изделию [5]. Такая информация содержится в автоматизированных системах учета выпуска конструкторской документации и извещений об её изменении [9] и позволяет автоматизировать расчет себестоимости и сроков выполнения проекта [5, 10].

Существуют различные способы оценивания себестоимости разработки новых изделий, в том числе

создаваемых в рамках Государственного оборонного заказа [11]. Однако большинство таких методик не учитывают научно-теоретического уровня разработок, степени их новизны, а также изменения организационно-технических условий в процессе проведения исследований и разработок.

В соответствии с п. 5.6.1 Методических рекомендаций по нормированию труда на выполнение НИОКР [12] трудоемкость новой разработки  $W_n$  определяется по формуле

$$W_n = W_a \cdot K_{\text{пер}}, \quad (1)$$

где  $W_a$  – трудоемкость проекта-аналога, чел. мес.;

$K_{\text{пер}}$  – переводной коэффициент, учитывающий степень новизны и изменения организационно-технических условий исследования и разработки.

Таким образом, актуальным является вопрос определения данного коэффициента.

Введем множество проектов-аналогов  $A = \{A_1, A_2, A_n, \dots, A_N\}$ ,  $n = \overline{1, N}$ , где  $N$  – число выбранных проектов-аналогов.

Введем множество показателей сравнения  $K = \{K_1, K_2, K_m, \dots, K_M\}$ ,  $m = \overline{1, M}$ , где  $M$  – число этих показателей. При этом каждый показатель сравнения включает в себя классификационные признаки, то есть  $K = \{K_{m1}, K_{m2}, K_{ml}, \dots, K_{mL}\}$ ,  $l = \overline{1, L}$ , где  $L$  – число классификационных признаков для каждого показателя  $K_m$ .

### Показатели сравнения и классификационные признаки

Исходя из практического опыта по организации и выполнению НИОКР по созданию высокотехнологичных изделий ВВСТ и технологий в области специального машиностроения, целесообразно принять систему показателей и классификационных признаков для оценивания сложности таких проектов.

Показатель  $K_1$ : Наличие аналогов (изделие, технология). Оценивание степени новизны и уникальности нового проекта включает в себя следующие классификационные признаки:

- полный аналог ( $K_{11}$ ): новый проект (разработка) имеет полный аналог в виде существующего изделия или технологии. Существует продукт или технология, который полностью совпадает с новым проектом по функциональности, структуре или принципу работы;

- похожий аналог ( $K_{12}$ ): новый проект (разработка) имеет аналог, который схож с ним по каким-то признакам, но не является полным аналогом. Существуют продукты или технологии, которые выполняют схожие функции или используют аналогичные принципы работы, но имеют различия в структуре или основной идее;

- отсутствие аналогов ( $K_{13}$ ): новый проект (разработка) не имеет прямых или похожих аналогов. Разрабатываемый продукт или технология уникален и не имеет аналогов среди существующих продуктов или технологий.

Показатель  $K_2$ : Наличие информации о предметной области. Оценивание имеющейся информационной базы для разработки нового проекта включает в себя следующие классификационные признаки:

- полная достоверная информация ( $K_{21}$ ): имеется полная и достоверная информация о предметной области, что позволяет точно определить требования к разрабатываемому продукту или технологии, выявить особенности его создания;

- избыток информации (или недостоверность) ( $K_{22}$ ): имеется достаточно информации о предметной области, но часть ее является недостоверной или противоречивой. Требуется проведение дополнительных работ по проверке информации при разработке продукта или технологии;

- недостаточная, но практически достоверная информация ( $K_{23}$ ): имеется недостаточная информация о предметной области, но та, которая имеется, является достоверной. Требуется проведение исследований с целью получения дополнительной информации для разработки продукта или технологии;

- недостаточная и недостоверная информация ( $K_{24}$ ): имеется недостаточная информация о предметной области, а та информация, которая имеется, не является достоверной. Требуется проведение глубокого анализа и исследований предметной области для получения более точных данных для разработки продукта или технологии.

Показатель  $K_3$ : Преобладающая информация. Оценивание имеющейся информационной базы для разработки нового проекта включает в себя следующие классификационные признаки:

- в русскоязычных источниках ( $K_{31}$ ): необходимая информация о предметной области доступна в русскоязычных источниках, в том числе в научных статьях, монографиях, учебниках, научно-технических отчетах и т.д.;

- в англоязычных источниках ( $K_{32}$ ): необходимая информация о предметной области доступна в англоязычных источниках. Английский язык является международным языком коммуникации в сфере науки и технологий, поэтому англоязычные источники, как правило, содержат информацию об актуальных исследованиях, образцах техники (продуктах) и новых технологиях;

- в источниках на европейских языках ( $K_{33}$ ): необходимая информация о предметной области доступна на европейских языках, таких как немецкий, французский, испанский и т.д.;

- в источниках на китайском и прочих языках ( $K_{34}$ ): необходимая информация о предметной области доступна на китайском языке, а также на других языках, преобладающих в определенных регионах или странах. Учитывая значительное влияние Китая на мировую экономику и инновации, анализ информации на китайском языке позволяет определить современные тренды в области развития техники и технологий.

Показатель  $K_4$ : Принцип решения задачи. Выбор подхода к разработке нового проекта включает в себя следующие классификационные признаки:

- использован известный принцип ( $K_{41}$ ): задача решается путем применения уже известных и проверенных принципов разработки продукта или технологии, которые были успешно использованы в прошлом для решения аналогичных задач;

- выбран один из нескольких существующих принципов ( $K_{42}$ ): необходимо выбрать и обосновать один из существующих принципов разработки продукта или технологии, который наилучшим образом соответствует поставленной задаче;

- выбран один из нескольких принципов и изменен применительно к конкретной задаче ( $K_{43}$ ): необходимо существенно доработать один из существующих принципов разработки продукта или технологии для решения поставленной задачи;

- принцип связан с разрешением технического противоречия ( $K_{44}$ ): для решения задачи требуется разрешение технического противоречия, которое возникает при разработке нового продукта или технологии, а также улучшения существующего;

- требуется создание нового принципа решения задачи ( $K_{45}$ ): известные принципы разработки продукта или технологии не применимы для решения конкретной задачи.

Показатель  $K_5$ : Обработка информации. Оценивание трудоемкости обработки имеющейся информационной базы для разработки нового проекта включает в себя следующие классификационные признаки:

- систематизация информации, относящейся к объекту разработки и возможностям его функционирования, если выбран один из нескольких существующих принципов ( $K_{51}$ ): требуется систематизация информации, связанной с объектом разработки, и выявление его функциональных возможностей, если выбран один из уже существующих принципов;

- систематизация информации, относящейся к объекту разработки и возможностям его функционирования, если выбран один из нескольких принципов и изменен применительно к конкретной задаче ( $K_{52}$ ): требуется не только осуществить систематизацию информации с учетом выбранного принципа, но и ее последующее изменение или адаптацию к конкретным проектным задачам;



- переработка информации применительно к решаемой задаче ( $K_{53}$ ): требуется переработка имеющейся информации с целью ее адаптации и применения к конкретной задаче разработки, в том числе анализ и синтез данных, модификация методов исследования или алгоритмов и т.д.;

- создание информационной базы по косвенным источникам ( $K_{54}$ ): требуется учитывать информацию, полученную из косвенных источников, такие как отзывы потребителей, аналогичные проекты и т.д.

Показатель  $K_6$ : Сложность решения задачи. Оценка технической, технологической и организационной сложности разработки нового проекта включает в себя следующие классификационные признаки:

- требуется привлечение специалистов в одной области знаний ( $K_{61}$ ): решение задачи требует привлечения специалистов из одной области знаний. Проект сосредоточен на использовании определенной технологии или научно-методического аппарата;

- требуется привлечение специалистов в нескольких областях знаний ( $K_{62}$ ): решение задачи требует привлечения специалистов из нескольких различных областей знаний. Реализация проекта требует интеграции различных технологий, междисциплинарного подхода или решения сложных организационно-технических задач;

- требуется привлечение уникальных специалистов ( $K_{63}$ ): решение задачи предполагает привлечение специалистов с уникальными навыками или опытом работы с определенными технологиями или инновационными методиками.

Показатель  $K_7$ : Сложность обоснования выбранного направления исследования. Выбор и обоснование направления разработки нового проекта включает в себя следующие классификационные признаки:

- низкая сложность ( $K_{71}$ ): обоснование выбранного направления исследования является относительно простым и не требует существенных затрат времени и ресурсов. Основная идея направления исследования подтверждена широко признанными фактами, данными или теориями;

- средняя сложность ( $K_{72}$ ): обоснование выбранного направления исследования требует проведения анализа предметной области. Требуется рассмотреть несколько альтернативных направлений проведения исследования, учесть разнообразные точки зрения и факторы, которые могут влиять на выбор направления исследования;

- высокая сложность ( $K_{73}$ ): обоснование выбранного направления исследования представляет собой сложную задачу, требующую глубокого исследования и учета множества разнородных факторов. Обоснование направления исследования осуществляется в условиях неопределенности в исходных данных, неоднозначности результатов предыдущих исследо-

ваний или противоречивыми точками зрения в профессиональном сообществе.

Показатель  $K_8$ : Важность решения задачи (масштаб внедрения). Оценка важности разработки нового проекта включает в себя следующие классификационные признаки:

- локальный ( $K_{81}$ ): проект ориентирован на локальный уровень и влияет на относительно небольшую группу потребителей. Применение разрабатываемого продукта или технологии ограничено конкретными организациями или предприятиями;

- отраслевой ( $K_{82}$ ): проект имеет большое значение для какой-либо отрасли народного хозяйства и охватывает несколько организаций (предприятий) или секторов экономики. Применение разрабатываемого продукта или технологии может повлиять на стандарты, практики и направления развития в определенной отрасли;

- межотраслевой ( $K_{83}$ ): проект имеет широкое воздействие на межотраслевом уровне и охватывает несколько отраслей народного хозяйства. Применение разрабатываемого продукта или технологии может изменить существующие процессы, стандарты и взаимодействия между различными отраслями, а также способствовать созданию новых рыночных возможностей.

Важно подчеркнуть, что предложенные показатели и классификационные признаки являются достаточными для оперативной оценки сложности новых проектов (разработок) на основе проектов-аналогов. В зависимости от особенностей конкретных отраслей и организаций (предприятий) российской промышленности, а также особенностей создаваемых изделий и технологий предлагаемая система показателей может быть дополнена. При этом практика организации НИОКР свидетельствует о том, что система показателей сложности проектов должна быть гибкой и адаптивной, позволяя учитывать широкий спектр факторов, влияющих на сложность и успешность новых разработок.

### Сопоставление характеристик нового проекта с проектами-аналогами и обработка результатов

Числовые значения вышепредложенных показателей представлены в **табл. 1**, также в ней приведен пример оценивания сложности проектов  $A_n$  из множества проектов-аналогов  $A$  и нового проекта  $A''$  по созданию продукта или технологии.

Как видно из **табл. 1**, каждому проекту  $A_n$  из множества проектов-аналогов  $A$ , а также новому проекту по созданию продукта или технологии  $A''$  выставляются оценки по каждому показателю сравнения  $K_m$  с использованием предложенной шкалы значений соответствующих классификационных признаков  $K_{mi}$ .

Таблица 1. Система показателей для оценивания сложности НИОКР и пример оценки проектов-аналогов  $A_n$  и нового проекта  $A''$  по этим показателям

Table 1. System of indicators for evaluating the complexity of R&D and example evaluation of analogous projects  $A_n$  and the new project  $A''$  based on these indicators

Обозначение показателя	Показатели для сравнения	Предлагаемые значения (не более или интервал)	Пример оценки проектов			
			$A_1$	...	$A_N$	$A''$
$K_1$	<b>Наличие аналогов (изделие, технология):</b>					
$K_{11}$	Полный аналог	1,00	—	...	1,00	—
$K_{12}$	Похожий аналог	1,50	1,50	...	—	1,50
$K_{13}$	Отсутствие аналога	2,00	—	...	—	—
$K_2$	<b>Наличие информации о предметной области:</b>					
$K_{21}$	Полная достоверная информация	0,8–1,2	—	...	—	—
$K_{22}$	Избыток информации (или недостоверная информация)	1,2–1,5	1,20	...	1,20	—
$K_{23}$	Недостаточная, но практически достоверная информация	1,5–2,0	—	...	—	1,80
$K_{24}$	Недостаточная и недостоверная информация	2,0–2,2	—	...	—	—
$K_3$	<b>Преобладающая информация:</b>					
$K_{31}$	В русскоязычных источниках	1,00	—	...	1,00	—
$K_{32}$	В англоязычных источниках	1,10	1,10	...	—	1,10
$K_{33}$	В источниках на европейских языках	1,20	—	...	—	—
$K_{34}$	В источниках на китайском языке или прочих языках	1,50	—	...	—	—
$K_4$	<b>Принцип решения задачи:</b>					
$K_{41}$	Использован известный принцип	1,00	—	...	—	—
$K_{42}$	Выбран один из нескольких существующих принципов	2,00	2,00	...	2,00	2,00
$K_{43}$	Выбран один из нескольких принципов и изменен применительно к конкретной задаче	3,00	—	...	—	—
$K_{44}$	Принцип связан с разрешением технического противоречия	5,00	—	...	—	—
$K_{45}$	Потребовалось создание нового принципа решения задачи	10,00	—	...	—	—
$K_5$	<b>Обработка информации:</b>					
$K_{51}$	Систематизация информации, относящейся к объекту разработки и возможностям его функционирования, если выбран один из нескольких существующих принципов	0,80	—	...	—	—
$K_{52}$	Систематизация информации, относящейся к объекту разработки и возможностям его функционирования, если выбран один из нескольких принципов и изменен применительно к конкретной задаче	1,50	—	...	—	—
$K_{53}$	Переработка информации применительно к решаемой задаче	2,00	1,80	...	1,30	—
$K_{54}$	Создание информационной базы по косвенным источникам	3,00	—	...	—	2,00
$K_6$	<b>Сложность решения задачи:</b>					
$K_{61}$	Требуется привлечение специалистов в одной области знаний	1,00	—	...	—	—
$K_{62}$	Требуется привлечение специалистов в нескольких областях знаний	2,00	1,40	...	1,80	1,80
$K_{63}$	Требуется привлечение уникальных специалистов	3,00	—	—	—	—
$K_7$	<b>Сложность обоснования выбранного направления исследования:</b>					
$K_{71}$	Низкая	0,8-1,2	—	...	—	—
$K_{72}$	Средняя	1,2-1,5	1,50	...	1,40	—
$K_{73}$	Высокая	1,5-2,0	—	...	—	1,90
$K_8$	<b>Важность решения задачи (масштаб внедрения):</b>					
$K_{81}$	Локальный	1,00	—	...	—	—
$K_{82}$	Отраслевой	1,20	1,20	...	—	1,20
$K_{83}$	Межотраслевой	1,50	—	...	1,50	—
	Произведение коэффициентов		17,9626	...	11,7936	48,7555
$K_{\text{пер}}(A_n)$	Переводной коэффициент		2,7143	...	4,1341	—

При этом для повышения наглядности оценок целесообразно использовать лучевые диаграммы [13]. Пример такой диаграммы приведен на **рис. 3**.

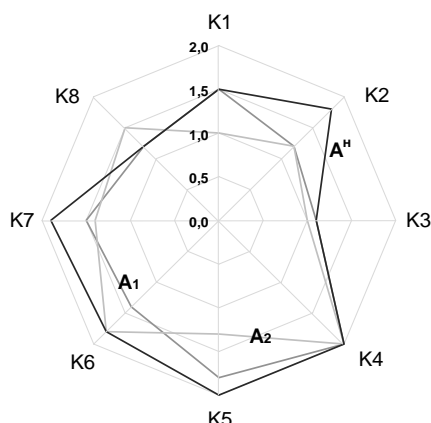


Рис. 3. Лучевая диаграмма оценки проектов по показателям  $K_m$

Fig. 3. Ray diagram of project evaluation by indicators  $K_m$

Анализ **рис. 3** показывает, что новый проект  $A''$  является более сложным, чем проекты-аналоги  $A_1$  и  $A_2$  по показателям  $K_2$ ,  $K_5$  и  $K_7$ , то есть характеризуется недостатком достоверной информации о предметной области, сложностью ее обработки, сложностью обоснования направления исследования.

Переводной коэффициент  $K_{\text{пер}}(A_n)$ , устанавливающий соответствие каждого проекта-аналога  $A_n$  новому проекту  $A''$ , рассчитывается следующим образом:

$$K_{\text{пер}}(A_n) = \prod_{m=1}^M K_m(A'') / \prod_{m=1}^M K_m(A_n). \quad (2)$$

Важно отметить, что предлагаемые числовые значения показателей сравнения  $K_m$  могут быть изменены с учетом особенностей производственной деятельности конкретной организации (предприятия), выполняющей проект. Каждая организация имеет свою уникальную организационную структуру, технологические возможности, уровень квалификации персонала, доступность ресурсов, методы работы, что может существенно повлиять на оценку сложности выполнения НИОКР.

Оценивание сложности разрабатываемого нового продукта или технологии  $A''$  и проектов-аналогов  $A_n$  осуществляется, как правило, на основе метода экспертных оценок.

Итак, пусть имеется множество экспертов  $E = \{E_1, E_2, E_q, \dots, E_Q\}$ ,  $q = \overline{1, Q}$ , где  $Q$  – число экспертов.

Каждый эксперт  $E_q$  анализирует и оценивает проект  $A''$  и проекты-аналоги  $A_n$  в соответствии с системой показателей и их числовых значений, представ-

ленных в **табл. 1**. В результате получаются оценки  $K_{ml}(A_n) \rightarrow K_m(A_n)$  и  $K_{ml}(A'') \rightarrow K_m(A'')$ , где  $n = \overline{1, N}$ ,  $m = \overline{1, M}$ ,  $l = \overline{1, L}$ .

Далее по формуле (2) рассчитываются переводные коэффициенты  $K_{\text{пер}}^q(A_n)$ .

После проведения сравнения проектов каждым из экспертов  $E_q$  встает вопрос определения результирующего переводного коэффициента  $\overline{K}_{\text{пер}}(A_n)$ , выражающего групповое экспертное мнение.

На практике применяется множество подходов решения задачи нахождения групповой экспертной оценки [14]. Однако с целью упрощения обработки результатов и с учетом особенностей решаемой задачи в конкретном случае допустимо в качестве групповой оценки использовать среднее арифметическое экспертных оценок, то есть

$$\overline{K}_{\text{пер}}(A_n) = \sum_{q=1}^Q K_{\text{пер}}^q(A_n) / Q, \quad (3)$$

где  $q = \overline{1, Q}$ .

После этого переводной коэффициент (3) используется в уравнении (1) для определения расчетных трудоемкостей  $W_n(A_n)$  нового проекта  $A''$  относительно проекта-аналога  $A_n$ , а затем определяется средняя прогнозная трудоемкость нового проекта:

$$W_n^{\text{прог}} = \sum_{n=1}^N \overline{K}_{\text{пер}}(A_n) \cdot \overline{W}_n(A_n) / N, \quad (4)$$

где  $n = \overline{1, N}$ , а  $\overline{W}_n(A_n)$  – средняя расчетная трудоемкость нового проекта  $A''$  по проекту-аналогу  $A_n$ , которая определяется как

$$\overline{W}_n(A_n) = \sum_{q=1}^Q W_n^q(A_n) / Q, \quad (5)$$

где  $q = \overline{1, Q}$ .

Следует отметить, что процесс оценивания сложности проекта на основе проектов-аналогов должен быть статистически релевантным с точки зрения теории обработки эксперимента.

Переводные коэффициенты  $K_{\text{пер}}^q(A_n)$ , как правило, представлены малой выборкой, равной числу экспертов  $Q$ , привлекаемых для оценивания проектов.

Численные эксперименты показывают, что для обработки экспертных оценок в методике экспресс-анализа должно выполняться условие  $Q \geq 5$ . Это позволяет использовать методы непараметрической статистики, такие как бутстреп, предложенный Брэдли Эфроном в 1979 году [15], для расширения исходной выборки и получения адекватных результатов анализа. Формализованное описание процесса бутстреп-анализа представлено на **рис. 4**.

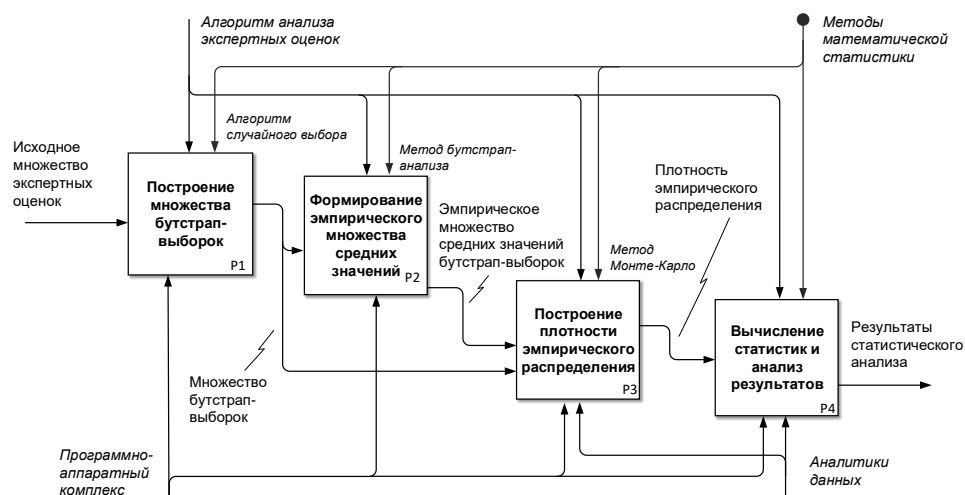


Рис. 4. Формализованное описание бутстрап-анализа  
Fig. 4. Formalized description of bootstrap analysis

Как видно из рис. 4, суть метода заключается в построении по имеющейся малой выборке эмпирического распределения за счет извлечения элементов из исходной выборки случайным образом с повторением (возвратом значения) и формирования множества бутстрап-выборок той же размерности, что и исходная выборка. При этом число бутстрап-выборок ограничивается исключительно вычислительными возможностями и может составлять 10 000 и более. Затем рассчитываются средние значения бутстрап-выборок. После чего методом Монте-Карло [16] строится плотность эмпирического распределения средних значений бутстрап-выборок, по которой вычисляются интересные статистики.

Важно отметить, что размерность формируемой выборки средних значений бутстрап-выборок зависит от размерности исходной выборки. Число комбинаций, образующих уникальные средние значения бутстрап-выборок, будет равно числу сочетаний из  $Q$  по  $Q$  с повторениями, а именно

$$Q_{BC}(Q) = \bar{C}_Q^Q = C_{2Q-1}^Q = \frac{(2Q-1)!}{(Q-1)!Q!}. \quad (6)$$

Таким образом, возможность расширения исходной выборки определяется зависимостью (6), представленной в виде графика на рис. 5.

Из анализа рис. 5 видно, почему установлено ограничение на минимальное число экспертов ( $Q \geq 5$ ).

Оценим погрешность (доверительный интервал) для определенного значения себестоимости нового проекта  $A^n$ . Пусть переходной коэффициент  $\bar{K}_{пер}(A_n)$  является средневзвешенной оценкой бутстрап-выборок со стандартной ошибкой среднего  $S_{\bar{K}_{пер}}$ , которая для смещенной оценки с учетом поправки Бесселя определяется следующим образом [16]:

$$S_{\bar{K}_{пер}}(A_n) = \sqrt{\frac{\sum_{q=1}^Q (K_{пер}^q(A_n) - \bar{K}_{пер}(A_n))^2}{Q(Q-1)}}. \quad (7)$$

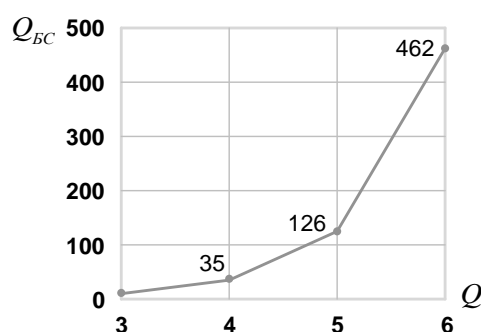


Рис. 5. Зависимость  $Q_{BC}(Q)$

Fig. 5. Dependence  $Q_{BC}(Q)$

Доверительный интервал для  $\bar{K}_{пер}(A_n)$  будет иметь вид

$$\bar{K}_{пер}(A_n) - t_{\beta, Q} \cdot S_{\bar{K}_{пер}}(A_n) < M(K_{пер}(A_n)) < \bar{K}_{пер}(A_n) + t_{\beta, Q} \cdot S_{\bar{K}_{пер}}(A_n), \quad (8)$$

где  $M(K_{пер}(A_n))$  – математическое ожидание переходного коэффициента проекта  $A_n$ , а  $t_{\beta, Q}$  – коэффициент Стьюдента, зависящий от заданного уровня доверительной вероятности (при решении технических задач, как правило, принимают  $\beta = 0,95$ ) и числа измерений (в данном случае числа экспертов  $Q = Q_{BC}$ ).

Тогда результат оценки себестоимости нового проекта  $A^n$  будет определяться со следующей погрешностью:

$$W_n^{рез} = \bar{W}_n^{прог} \pm \Delta W_n^{прог}, \quad (9)$$



$$\Delta W_n^{\text{прог}} = \sum_{n=1}^N \overline{W}_n(A_n) \cdot t_{\beta, Q} \cdot S_{\overline{K}_{\text{пер}}}(A_n) / N. \quad (10)$$

В следующем разделе рассмотрим пример применения предлагаемой экспресс-методики.

### Пример применения экспресс-методики

Важно подчеркнуть, что работы, выбранные для сравнения, должны быть близки не только по характеру, но и по срокам, и по объему отчетной научно-технической документации, поэтому предлагается проводить оценку работ не по проекту в целом, а по аналогичным этапам работ, а затем суммировать предполагаемую трудоемкость.

Пример оценивания переводного коэффициента для проектов-аналогов и трудоемкости выполнения нового проекта  $A''$  на основе предлагаемой методики экспресс-анализа представлен в табл. 2.

Таблица 2. Расчет трудоемкости выполнения НИОКР по созданию изделия  $A''$   
Table 2. Calculation of labor intensity for R&D projects in product development  $A''$

Номер этапа	Эксперт	$A_1$			$A_2$			Средняя трудоемкость по аналогам $W_n^q(A_1, A_2)$ , чел. мес.	Прогнозная трудоемкость $W_n^{\text{прог}}$ , чел. мес.
		Трудоемкость аналога $W_a(A_1)$ , чел. мес.	Переводной коэффициент $K_{\text{пер}}^q(A_1)$	Расчетная трудоемкость $W_n^q(A_1)$ , чел. мес.	Трудоемкость аналога $W_a(A_2)$ , чел. мес.	Переводной коэффициент $K_{\text{пер}}^q(A_2)$	Расчетная трудоемкость $W_n^q(A_2)$ , чел. мес.		
1	$E_1$	51,63	2,7143	140,14	41,12	4,1341	169,99	155,07	154,57
	$E_2$		2,6789	138,31		3,9807	163,69	151,00	
	$E_3$		2,7916	144,13		4,0517	166,61	155,37	
	$E_4$		2,7224	140,56		4,1938	172,45	156,50	
	$E_5$		2,6983	139,31		4,1476	170,55	154,93	
2	$E_1$	39,98	5,4167	216,56	55,14	4,0107	221,15	218,85	216,42
	$E_2$		5,3435	213,63		3,9602	218,37	216,00	
	$E_3$		5,4893	219,46		3,9721	219,02	219,24	
	$E_4$		5,4281	217,02		3,9592	218,31	217,66	
	$E_5$		5,0574	202,19		3,9617	218,95	210,57	
3	$E_1$	53,14	4,0912	217,41	154,16	1,5291	235,73	226,57	230,41
	$E_2$		4,2167	224,08		1,5438	237,99	231,03	
	$E_3$		4,3231	229,73		1,5253	235,14	232,43	
	$E_4$		4,2915	228,05		1,5349	236,62	232,34	
	$E_5$		4,1746	221,84		1,5407	237,51	229,68	

Таблица 3. Пессимистичная, средняя и оптимистичная оценки трудоемкости  
Table 3. Pessimistic, average and optimistic estimates of labor intensity

Но- мер эта- па	$A_1$			$A_2$			Мини- мальная прогнозная трудо- емкость $\min(W_n^{\text{прог}})$ , чел.мес.	Средняя про- гнозная тру- доемкость $\overline{W}_n^{\text{прог}}$ , чел.мес.	Макси- мальная прогнозная трудоемкость $\max(W_n^{\text{прог}})$ , чел. мес.
	Мини- мальный переводной коэффици- ент аналога $K_{\text{пер}}^{\min}(A_1)$	Средний переводной коэффици- ент аналога $\overline{K}_{\text{пер}}(A_1)$	Макси- мальный переводной коэффици- ент аналога $K_{\text{пер}}^{\max}(A_1)$	Мини- мальный переводной коэффици- ент аналога $K_{\text{пер}}^{\min}(A_2)$	Средний перевод- ной коэф- фициент аналога $\overline{K}_{\text{пер}}(A_2)$	Макси- мальный переводной коэффици- ент аналога $K_{\text{пер}}^{\max}(A_2)$			
1	2,6789	2,7211	2,7916	3,9807	4,1016	4,1938	151,00	154,57	158,29
2	5,0574	5,3470	5,4893	3,9592	3,9728	4,0107	210,25	216,42	220,31
3	4,0912	4,2194	4,3231	1,5253	1,5327	1,5438	226,27	230,01	233,86

С целью сравнения полученных результатов с результатами бутстрап-анализа рассмотрим плотности распределения средних значений бутстрап-выборок переходных коэффициентов  $K_{\text{пер}}(A_1)$  и  $K_{\text{пер}}(A_2)$  для первого этапа НИОКР по созданию изделия  $A''$  (рис. 6).

Из анализа рис. 6 видно, что плотности распределения средних значений бутстрап-выборок переходных коэффициентов  $K_{\text{пер}}(A_1)$  и  $K_{\text{пер}}(A_2)$  соответствуют нормальному закону распределения. В рассматриваемом примере это обусловлено достаточно высокой согласованностью экспертных мнений.

Рассмотрим плотность распределения средних значений бутстрап-выборки переходных коэффициентов  $K_{\text{пер}}(A_1)$  и  $K_{\text{пер}}(A_2)$  для второго этапа НИОКР по созданию изделия  $A''$  (рис. 7).

Из анализа рис. 7 видно, что плотности распределения средних значений бутстрап-выборок переходных коэффициентов  $K_{\text{пер}}(A_1)$  и  $K_{\text{пер}}(A_2)$  соответствуют нормальному и логонормальному законам распределения.

Следует отметить, что набор наблюдаемых данных, как правило, можно описать одним из принятых в математической статистике типовых законов распределения случайной величины, используя соотношение между коэффициентами асимметрии и эксцесса. Такой подход подробно описан, например, в работе [15].

Пример оценивания погрешности определения трудоемкости, выполненный в соответствии с формулами (6)–(9), представлен в табл. 4.

Как видно из анализа табл. 3 и 4, рассматривая задачу в вероятностной постановке, доверительный интервал оказывается значительно шире ( $\pm 8,5\%$ ), чем в детерминированной ( $\pm 2,5\%$ ). Это связано с тем, что в детерминированной постановке оценка параметров модели основывается на предположении о точности входных данных без учета случайных вариаций и неопределенности.

Выполненный анализ показывает, что оценка погрешности определения трудоемкости является допустимой и предлагаемая экспресс-методика может применяться в практике технико-экономического обоснования финансово-экономических показателей новых исследований и разработок.

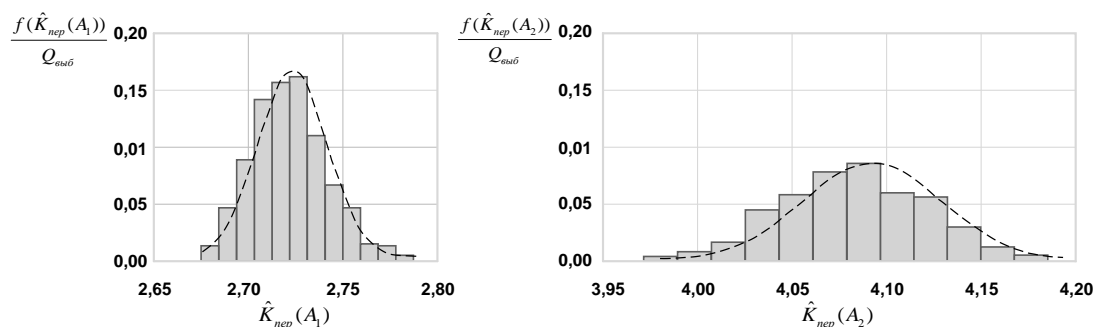


Рис. 6. Плотности распределения средних значений бутстрап-выборок переходных коэффициентов  $K_{\text{пер}}(A_1)$  и  $K_{\text{пер}}(A_2)$  для первого этапа НИОКР

Fig. 6. Distribution densities of the average values of bootstrap samples for conversion coefficients  $K_{\text{пер}}(A_1)$  and  $K_{\text{пер}}(A_2)$  for the first stage of R&D

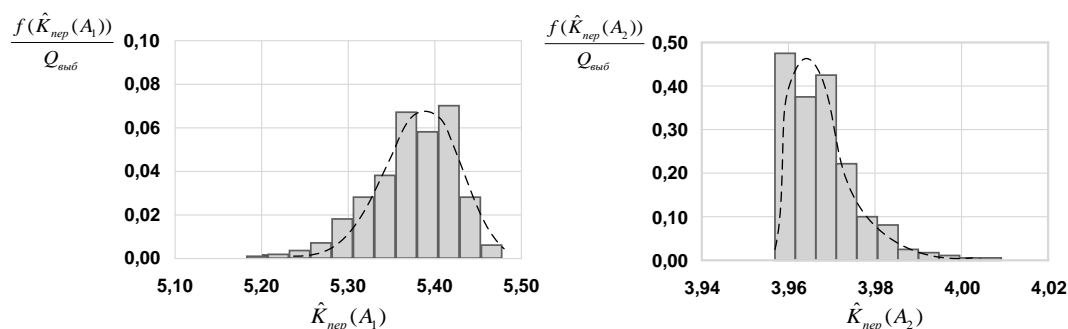


Рис. 7. Плотности распределения средних значений бутстрап-выборок переходных коэффициентов  $K_{\text{пер}}(A_1)$  и  $K_{\text{пер}}(A_2)$  для второго этапа НИОКР

Fig. 7. Distribution densities of the average values of bootstrap samples for conversion coefficients  $K_{\text{пер}}(A_1)$  and  $K_{\text{пер}}(A_2)$  for the second stage of R&D

Таблица 4. Оценка погрешности определения трудоемкости  $\pm \Delta W_n^{\text{прог}}$ Table 4. Estimation of error in determining labor intensity  $\pm \Delta W_n^{\text{прог}}$ 

Номер этапа	Математическое ожидание переводного коэффициента аналога $K_{\text{пер}}(A_1)$	Стандартная ошибка среднего $S_{K_{\text{пер}}}(A_1)$	Средняя расчетная трудоемкость по аналогу $W_n(A_1)$ , чел. мес.	Математическое ожидание переводного коэффициента аналога $K_{\text{пер}}(A_2)$	Стандартная ошибка среднего $S_{K_{\text{пер}}}(A_2)$	Средняя расчетная трудоемкость по аналогу $W_n(A_2)$ , чел. мес.	Средняя прогнозная трудоемкость $\bar{W}_n^{\text{прог}}$ , чел. мес.	Погрешность определения трудоемкости $\pm \Delta W_n^{\text{прог}}$ при $\beta = 0,95$ , $Q = 126$
1	2,7249	0,0191	140,687	4,0917	0,0379	168,251	154,42	$\pm 9,07 (\pm 5,9\%)$
2	5,3755	0,0760	214,912	3,9614	0,0098	218,431	216,67	$\pm 18,47 (\pm 8,5\%)$
3	4,2416	0,0415	225,399	1,5325	0,0035	236,250	230,82	$\pm 10,16 (\pm 4,7\%)$

### Закключение

Оценка сложности на основе аналогов является полезным инструментом в начальных стадиях проекта. Однако необходимо помнить, что каждый проект уникален, и данные проектов-аналогов должны использоваться как точная оценка сложности нового проекта (изделия или технологии).

Тем не менее определение переходного коэффициента, который определяет сложность разрабатываемых продуктов или технологий, играет ключевую роль в прогнозировании трудоемкости выполнения работ. Этот коэффициент выступает важным индикатором, который помогает определить не только потребный уровень усилий и ресурсов, но и сроки выполнения проекта. Такой подход позволяет организации более рационально планировать свои действия и избегать потенциальных рисков и неожиданных затрат.

Точная оценка сложности проекта требует комплексного анализа, учитывающего не только данные аналогов, но и уникальные особенности самого проекта, такие как его цели, технические требования и степень инновационности. Кроме того, в процессе оценивания сложности новых проектов следует учитывать возможные изменения в ходе разработки, чтобы обеспечить точное планирование и успешное выполнение работ.

### Список источников

1. Кравченко Т.К., Исаев Д.В. Оценка сложности инновационных проектов // Инновации. 2017. № 5(223). С. 90-98.
2. Катыхшева Е.Г. Методология формирования системы нормативов трудоемкости научно-исследовательской продукции для повышения эффективности НИОКР // Записки Горного института. 2009. №184. С. 39-45.
3. Глебова О.В., Борискова Л.А. Система показателей для оценки эффективности научно-технических разработок научно-производственных предприятий на разных стадиях жизненного цикла // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2011. №3. С. 23-29.
4. Степанова Ю.Н. Критериальная оценка инновационных разработок // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2021. № 83(1). С. 455-459. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-1-455-459>.
5. Щеглов Д.К., Сайбель А.Г. Формализованный подход к прогнозированию сроков и стоимости разработки военно-технических систем // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2022. № 3 (155). С. 33-44.
6. Козин Э.Ф. Этапы и методы оценки эффективности инновационных проектов: структурные взаимосвязи // Инновации. 2012. № 1(159). С. 100-104.
7. Р 50.1.028-2001. Рекомендации по стандартизации. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования. М.: Росстандарт России, 2001. 54 с.
8. Михеев А.В. Анализ больших данных для обоснования решений по научно-технологическому развитию в энергетике // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 4(20). С. 158-167. <https://doi.org/10.38028/ESI.2020.20.4.014>.
9. Чубуков А.А., Капалыга Т.Н., Щеглов Д.К. Автоматизированная система учёта выпуска конструкторской документации и извещений об её изменении: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023687947, 19.12.2023.
10. Щеглов Д.К. Мобильное приложение для определения сроков и себестоимости выполнения проектно-конструкторских работ по государственному оборонному заказу: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024615912, 14.03.2024.
11. Shcheglov D.K. Express method for determining deadlines and costs of project design works by defense industry enterprises // Инновации в менеджменте. 2024. № 1 (39). С. 46-54.
12. Методические рекомендации по нормированию труда на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (утв. ФГБУ НИИ ТСС Минтруда России 07.03.2014 №006). Консультант Плюс. URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_308907/576245b522294624269f6888e590b4a30abd1038/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_308907/576245b522294624269f6888e590b4a30abd1038/) (дата обращения: 18.02.2024)
13. Развитие производства гражданской продукции на предприятиях оборонно-промышленного комплекса: монография / Д.К. Щеглов и др. М.: ООО «Айти-Сервис», 2021. 163 с.
14. Орлов А.И. О средних величинах // Управление большими системами: сборник трудов. М., 2013. № 46. С. 88-117.
15. Bühlmann P. Bootstraps for Time Series // Statistical Science. 2002, vol. 17, no. 1, pp. 52-72.

16. Илющенко Р.Р., Осипова Т.В. Обработка экспертных оценок при проведении научных проектов с привлечением экспертов федерального реестра // Инноватика и экспертиза. 2020. № 2(30) С. 65-79.
17. Бушуев А.Ю., Кутыркин А.В. Введение в прикладную теорию автоматов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 52 с.

# References

1. Kravchenko T.K., Isaev D.V. Assessment of the complexity of innovative projects. *Innovatsii* [Innovations], 2017;(5(223)):90-98. (In Russ.)
2. Katysheva E.G. Methodology for the formation of a system of labor intensity standards for research products to improve the efficiency of R&D. *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute], 2009;(184):39-45. (In Russ.)
3. Glebova O.V., Boriskova L.A. System of indicators for assessing the effectiveness of scientific and technical developments of scientific and industrial enterprises at different stages of the life cycle. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii* [Intelligence. Innovations. Investments], 2011;(3):23-29. (In Russ.)
4. Stepanova Yu.N. Criterial assessment of innovative developments. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy* [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies], 2021;(83(1)):455-459. (In Russ.) <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-1-455-459>
5. Shcheglov D.K., Saibel A.G. Formalized approach to forecasting the timing and cost of developing military-technical systems. *Oboronnii kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii* [Defense complex – scientific and technical progress of Russia], 2022;(3(155)):33-44. (In Russ.)
6. Kozin E.F. Stages and methods of assessing the effectiveness of innovation projects: structural relationships. *Innovatsii* [Innovations], 2012;(1(159)):100-104. (In Russ.)
7. R 50.1.028-2001 Recommendations for standardization. Information technologies for supporting the product life cycle. Methodology of functional modeling. Moscow, Rosstandart of Russia, 2001, 54 p.
8. Mikheev A.V. Big data analysis to substantiate decisions on scientific and technological development in the energy sector. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and Mathematical Technologies in

- Science and Management], 2020;(4(20)):158-167. <https://doi.org/10.38028/ESI.2020.20.4.014> (In Russ.)
9. Chubukov A.A., Kapalyga T.N., Shcheglov D.K. *Avtomatizirovannaya sistema uchyota vypuska konstruktorskoy dokumentatsii i izveshcheniy ob eyo izmenenii* [Automated system for recording the release of design documentation and notifications of its changes]. Certificate of registration of computer program RU 2023687947, 19.12.2023.
10. Shcheglov D.K. Mobilnoe prilozhenie dlya opredeleniya srokov i sebestoimosti vypolneniya proektno-konstruktorskih rabot po gosudarstvennomu oboronnomu zakazu [Mobile application for determining the terms and cost of design and engineering work under a state defense order]. Certificate of registration of computer program RU 2024615912, 14.03.2024.
11. Shcheglov D.K. Express method for determining deadlines and costs of project design works by defense industry enterprises. *Innovatsii v menedzhmente* [Innovations in Management], 2024;(1(39)):46-54.
12. Methodological recommendations for labor standards for the performance of research and development work (approved by the Federal State Budgetary Institution Research Institute of TSS of the Ministry of Labor of Russia on March 7, 2014, No. 006). *Konsul'tant Plyus* [Consultant Plus]. Available at: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_30890\\_7/576245b522294624269f6888e590b4a30abd1038/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_30890_7/576245b522294624269f6888e590b4a30abd1038/) (Accessed February 18, 2024)
13. Shcheglov D.K. et al. *Razvitie proizvodstva grazhdanskoy produktitsii na predpriyatiyah oboronno-promyshlennogo kompleksa: monografiya* [Development of civilian production at defense industry enterprises: monograph]. Moscow: OOO IT-Service, 2021, 163 p. (In Russ.)
14. Orlov A.I. On average values. *Upravlenie bolshimi sistemami: sbornik trudov* [Management of large systems: collection of works], 2013;(46):88-117. (In Russ.)
15. Bühlmann P. Bootstraps for Time Series. *Statistical Science*. 2002;17(1):52-72
16. Ilyushchenko R.R., Osipova T.V. Processing of expert assessments during scientific projects involving experts from the federal register. *Innovatika i ekspertiza* [Innovation and Expertise]. 2020;(2(30)):65-79. (In Russ.)
17. Bushuev A.Yu., Kutyrkin A.V. *Vvedenie v prikladnuyu teoriyu avtomatov* [Introduction to the applied theory of automata]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2004, 52 p. (In Russ.)

Поступила 21.08.2024; принята к публикации 25.11.2024; опубликована 30.06.2025  
Submitted 21/08/2024; revised 25/11/2024; published 30/06/2025

**Щеглов Дмитрий Константинович** – кандидат технических наук, доцент, научный руководитель, АО «Северо-Западный региональный центр Концерн ВКО «Алмаз – Антей» – Обуховский завод», Санкт-Петербург, Россия.  
Email: \_dk@bk.ru. ORCID 0000-0003-2459-7684

**Щеглов Константин Николаевич** – начальник научно-исследовательского отделения, Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия.  
Email: ohte\_2@mail.ru.

**Dmitry K. Shcheglov** – PhD (Eng.), Associate Professor, Scientific Supervisor, JSC North-West Regional Center of the Concern VKO Almaz – Antey – Obukhov Plant, St. Petersburg, Russia.  
Email: \_dk@bk.ru. ORCID 0000-0003-2459-7684

**Konstantin N. Shcheglov** – Head of Research Department, FSBEI HE Baltic State Technical University VOENMEH named after D.F. Ustinov», St. Petersburg, Russia.  
Email: ohte\_2@mail.ru.