

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова

2026. Т.24, №3

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. По результатам оценки межведомственной комиссии журнал включен в Единый государственный перечень научных изданий «Белый список» – 2 уровень. 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. Колокольников (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», 2026

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; 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 30.09.2026. Заказ 310. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2026. Vol.24, no.3

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. According to the results of the evaluation of the interdepartmental commission, the journal is included in the Unified State List of Scientific Publications "White List" level 2. 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. Khramshin (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. Khramshin, 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, 2026

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; 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: 30.09.2026. Order 310. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ	5
<i>Пашко А.Д., Великанов В.С., Булганина М.Ю.</i> Разработка концепции ситуационно-адаптивных мобильных автономных платформ для ограниченных пространств горно-металлургического комплекса.....	5
<i>Метелев А.А., Закирничный В.Н., Гарифулин М.Г., Пургин А.П., Морозов В.В.</i> Исследование и оптимизация процессов вторичной концентрации флотированной фракции в колонных флотационных машинах	14
<i>Макаров Н.В., Нурхожаев Е.С., Макаров В.Н., Попов С.А.</i> Теоретические основы зависимости аэродинамической нагруженности и энергоэффективности шахтных центробежных вентиляторов от диполя проницаемости на профиле лопаток рабочего колеса	25
ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.....	35
<i>Бирюков М.А., Песин А.М., Бирюкова О.Д., Пустовойтов Д.О., Могильных А.Е., Лактионов А.А.</i> Исследование влияния кинематической асимметрии на механические свойства нержавеющей стали марки 20Х13 при горячей прокатке	35
<i>Замараева Ю.В., Логинов Ю.Н., Дегтярева О.Ф., Разинкин А.В.</i> Влияние напряженно-деформированного состояния в процессе прессования легкосплавной бурильной трубы на образование трещин.....	43
<i>Бурлаков И.А., Деметрашвили И.С., Харитонов С.А.</i> Влияние прочности материала заготовок на величину напряжений в инструменте при холодной высадке заклепок	54
ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ..	63
<i>Воробьев А.А., Терентьев А.В., Покровская О.Д., Степанов А.А., Загородный Н.А.</i> Расчет сил при токарной обработке закаленных сталей в тяжелых условиях резания	63
<i>Кузнецов С.В., Роговик А.А.</i> Определение наименьшего значения параметра шероховатости на чертежах деталей среди поверхностей, полученных методами точения и фрезерования, с использованием моделей нейронных сетей.....	73
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ	82
<i>Башков А.А., Аносов М.С., Иванов С.В., Баженов Е.О., Акулова А.А., Чичеватов А.В.</i> Методы расчета фрактальной размерности по цифровому изображению микроструктуры для проведения количественной металлографии	82
ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО	93
<i>Феоктистов Н.А., Савинов А.С.</i> Оценка влияния комплекса Cr – N на износостойкость и параметры микроструктуры стальных отливок	93
НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ	100
<i>Чукин М.В., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю.</i> Связь коэффициента Зеебека с внутренней энергией аморфной магнитомягкой ленты класса FINEMET	100

CONTENTS

SUBSOIL USE	5
<i>Pashko A.D., Velikanov V.S.</i> Development of the Concept of Situation-Adaptive Mobile Autonomous Platforms for Confined Spaces in the Mining And Metallurgical Industry	5
<i>Metelev A.A., Zakirnichny V.N., Garifulin I.F., Purgin A.P., Morozov V.V.</i> Study and Optimization of Secondary Concentration Processes of the Flotated Fraction in Column Flotation Machines.....	14
<i>Makarov N.V., Nurkhoshaev E.S., Makarov V.N., Popov S.A.</i> Theoretical Foundations of the Dependence of Aerodynamic Loading and Energy Efficiency of Mine Centrifugal Fans on the Permeability Dipole on Impeller Blade Profiles	25
METAL FORMING	35
<i>Biryukov M.A., Pesin A.M., Biryukova O.D., Pustovoitov D.O., Mogilnykh A.E., Laktionov A.A.</i> Investigation of the Effect of Kinematic Asymmetry on the Mechanical Properties of 20Kh13 Stainless Steel During Hot Rolling	35
<i>Zamaraeva Yu.V., Loginov Yu.N., Degtyareva O.F., Razinkin A.V.</i> Influence of the Stress-Strain State During the Extrusion of a Light-Alloy Drill Pipe on Crack Formation	43
<i>Burlakov I.A., Demetrasvili I.S., Kharitonov S.A.</i> Influence of Blank Material Strength on Tool Stresses During Cold Heading of Rivets.....	54
MATERIAL PROCESS ENGINEERING.....	63
<i>Vorobyov A.A., Terentyev A.V., Pokrovskaya O.D., Stepanov A.A., Zagorodny N.A.</i> Calculation of Forces in the Turning of Hardened Steels Under Heavy Cutting Conditions.....	63
<i>Kuznetsov S.V., Rogovik A.A.</i> Determination of the Minimum Surface Roughness Parameter Value in Engineering Drawings of Parts Among Surfaces Produced by Turning and Milling Using Neural Network Models	73
MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS.....	82
<i>Bashkov A.A., Anosov M.S., Ivanov S.V., Bazhenov E.O., Akulova A.A., Chichevatov A.V.</i> Methods for Calculating Fractal Dimension from Digital Microstructure Images for Quantitative Metallography.....	82
FOUNDRY ENGINEERING.....	93
<i>Feoktistov N.A., Savinov A.S.</i> Assessment of the Effect of the Cr – N Complex on the Wear Resistance and Microstructural Parameters of Steel Castings	93
NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES	100
<i>Chukin M.V., Koptseva N.V., Efimova Yu.Y.</i> Relationship Between the Seebeck Coefficient and the Internal Energy of the Finemet-Class Amorphous Soft Magnetic Ribbon.....	100

**УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ.
СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВА 108**

*Тулупов О.Н., Черяпкин А.Ф., Наркевич М.Ю.,
Логунова О.С., Наркевич А.М., Логунова П.С.*
Концепция цифровизации при оценке качества
элементов опасных производственных объектов 108

*Казанцева Т.В., Соколова Т.Б., Казанцева Н.К.,
Михеева С.В., Полякова М.А.*
Управление рисками в системе менеджмента
предприятия 123

Евлоева М.В., Конюхов В.Ю., Опарина Т.А.
Повышение устойчивости промышленных
предприятий в условиях неопределенности
при интеграции ESG-стратегии и бизнес-процессов... 130

Сойко А.И., Савельева Д.А., Денисова Я.В.
Установление требований к точности средств
измерений на основе статистического моделирования
показателей воспроизводимости процесса..... 136

Запорожцев А. В., Хазова Вер. И., Хазова Вик. И.
Анализ возможности замены детальной модели
производственного потока его эквивалентной
моделью 143

**НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
И ОБОРУДОВАНИЕ 150**

Глчян Н.Ш., Лосев А.С.
Оценка площади материала, расплавленного
под действием одиночного лазерного импульса
в продольном сечении трещины 150

*Аносов М.С., Шатагин Д.А., Баевский А.А.,
Подувальцев А.А., Архипов М.В., Ямгулин Р.И.*
Разработка комплексного подхода диагностики
процессов сварки и аддитивного электродугового
выращивания..... 156

*Колодяжный Д.Ю., Шабалин Д.Н., Ларионов Е.О.,
Козарь И.И.*
Экспериментальное исследование плоского алмазного
шлифования статоров (роторов) конденсаторов
переменной емкости и подложек для микросхем
на станке модели 3102А 164

Тукмаков А.Л., Тукмаков Д.А., Ахундов А.А.
Численное моделирование выравнивания плотности
в двухкомпонентной газовой смеси вязких
сжимаемых теплопроводных газов..... 171

**ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ,
ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ
И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ.. 180**

*Трофимова С.Н., Сергеев Ю.С., Платов С.И.,
Толмачев Е.В., Резников И.М.*
Моделирование работы дифференциальной защиты
секций шин 110 кВ на базе микропроцессорного
устройства..... 180

**ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК
ПРОДУКЦИИ 188**

Бессоненко С.А., Осипов Н.И.
Анализ опыта и перспектив применения искусственного
интеллекта для управления перевозочным процессом
на железнодорожном транспорте 188

**PRODUCT QUALITY MANAGEMENT.
STANDARDIZATION. INDUSTRIAL
MANAGEMENT 108**

*Tulupov O.N., Cheryapkin A.F., Narkevich M.Yu.,
Logunova O.S., Narkevich A.M., Logunova P.S.*
Concept of Digitalization in Quality Assessment
of Elements of Hazardous Production Facilities 108

*Kazantseva T.V., Sokolova T.B., Kazantseva N.K.,
Mikheeva S.V., Polyakova M.A.*
Risk Management in an Enterprise Management
System 123

Evloeva M.V., Konyukhov V.Yu., Oparina T.A.
Enhancing the Resilience of Industrial Enterprises
under Conditions of Uncertainty Through the Integration
of Esg Strategy and Business Processes..... 130

Soyko A.I., Savelyeva D.A., Denisova Ya.V.
Establishing Requirements for the Accuracy
of Measuring Instruments Based on Statistical Modeling
of Process Reproducibility Indices 136

Zaporozhtsev A.V., Khazova Ver.I., Khazova Vik.I.
Analysis of the Feasibility of Replacing
a Detailed Production Flow Model with its Equivalent
Model..... 143

**NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES
AND EQUIPMENT 150**

Glychyan N.Sh., Losev A.S.
Estimation of the Area of Material Melted
under the Action of a Single Laser Pulse
in the Longitudinal Section of a Crack 150

*Anosov M.S., Shatagin D.A., Baevsky A.A.,
Poduval'tsev A.A., Arkhipov M.V., Yamgulin R.I.*
Development of an Integrated Approach
to the Diagnostics of Welding and Wire Arc Additive
Manufacturing Processes 156

*Kolodyazhnyi D.Yu., Shabalin D.N., Larionov E.O.,
Kozar I.I.*
Experimental Study of Surface Diamond Grinding
of Stators (Rotors) of adjustable Capacitors
and Microchip Substrates on a Model Z102A Grinding
Machine 164

Tukmakov A.L., Tukmakov D.A., Akhunov A.A.
Numerical Simulation of Density Equalization in a Two-
Component Gas Mixture of Viscous, Compressible, Heat-
Conducting Gases 171

**METALLURGICAL POWER ENGINEERING,
ENERGY SAVING AND ELECTRICAL
SYSTEMS 180**

*Trofimova S.N., Sergeev Yu.S., Platon S.I.,
Tolmachev E.V., Reznikov I.M.*
Modeling the Operation of 110 kV Busbar Section
Differential Protection Based on a Microprocessor-Based
Device..... 180

**ECONOMICS, MANAGEMENT AND PRODUCT
MARKET 188**

Bessonenko S.A., Osipov N.I.
Analysis of Experience and Prospects for the Application
of Artificial Intelligence to Railway Transport Operations
Management 188

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ СИТУАЦИОННО-АДАПТИВНЫХ
МОБИЛЬНЫХ АВТОНОМНЫХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ ОГРАНИЧЕННЫХ
ПРОСТРАНСТВ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСАПашко А.Д.¹, Великанов В.С.^{1,2}, Булганина М.Ю.²¹Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Аннотация. В горно-металлургическом комплексе (ГМК) работы в ограниченных пространствах (подземные выработки, технологические аппараты, коммуникации) сопряжены с высоким травматизмом (смертность в 3–5 раз выше среднепромышленной) и значительными экономическими потерями из-за простоев оборудования (20–30% фонда времени). Существующие роботизированные решения недостаточно адаптированы к условиям сенсорного вакуума, запылённости и динамическим изменениям среды. Целью работы является разработка концептуальных основ, архитектуры и научно-методического аппарата (включая формальные модели) для создания ситуационно-адаптивных мобильных автономных платформ (САМП), предназначенных для безопасного и эффективного выполнения задач в ограниченных пространствах ГМК. В качестве методов исследования использован системный анализ статистики травматизма и экономических потерь, методология FMEA для формализации требований, имитационное моделирование в цифровых двойниках (Unity, Unreal Engine с PhysX), лабораторное прототипирование на стендах «искусственная шахта» и «термобарокамера», а также полевые испытания на промышленных объектах. Научная новизна заключается в предложении концепции САМП на принципах модульности, контекстной автономности и глубокой киберфизической интеграции; в разработке гибридной модели SLAM для навигации в условиях сенсорного вакуума (ошибка позиционирования 0,8 м на 500 м против 4,2 м при использовании только лидара) и модели энергопотребления с оптимизацией затрат на топливо и деградацию аккумулятора. В результате систематизированы типовые ограниченные пространства ГМК, формализованы требования к платформам. Показано, что внедрение САМП позволяет снизить травматизм в целевых операциях на 70–90%, повысить производительность на 15–25%, сократить затраты на ремонт на 25–40%. Срок окупаемости парка из пяти платформ составляет 2,5–3 года. Практическая значимость состоит в предоставлении предприятиям ГМК структурированной методологии перехода к роботизации работ в ограниченных пространствах. Направления дальнейшего развития включают экспериментальную валидацию на полноразмерных прототипах, разработку самообучающихся алгоритмов семантического анализа дефектов и создание отраслевых стандартов обмена данными с цифровыми двойниками.

Ключевые слова: мобильная автономная платформа, ограниченное пространство, горно-металлургический комплекс, ситуационная адаптивность, математическая модель, совокупная стоимость владения, промышленная безопасность

© Пашко А.Д., Великанов В.С., Булганина М.Ю., 2026

Для цитирования

Пашко А.Д., Великанов В.С., Булганина М.Ю. Разработка концепции ситуационно-адаптивных мобильных автономных платформ для ограниченных пространств горно-металлургического комплекса // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 5-13. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-5-13>



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

DEVELOPMENT OF THE CONCEPT OF SITUATION-ADAPTIVE MOBILE AUTONOMOUS PLATFORMS FOR CONFINED SPACES IN THE MINING AND METALLURGICAL INDUSTRY

Pashko A.D.¹, Velikanov V.S.^{1,2}

¹Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

²Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

Abstract. In the mining and metallurgical industry (MMI), operations in confined spaces (underground workings, process equipment, and utility systems) are associated with a high incidence of occupational injuries (mortality rates 3-5 times higher than the industrial average) and significant economic losses due to equipment downtime (20-30% of the available operating time). Existing robotic solutions are insufficiently adapted to conditions characterized by sensor-deprived environments, high dust levels, and dynamic changes in the operating environment. The aim of this study is to develop the conceptual foundations, architecture, and scientific and methodological framework (including formal models) for the creation of situation-adaptive mobile autonomous platforms (SAMPs) designed to perform tasks safely and efficiently in confined spaces within the MMI. The research methods include a systematic analysis of occupational injury statistics and economic losses, the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) methodology for formalizing requirements, simulation modeling using digital twins (Unity and Unreal Engine with PhysX), laboratory prototyping on “artificial mine” and “thermobaric chamber” test benches, and field testing at industrial facilities. The scientific novelty lies in proposing the concept of SAMPs based on the principles of modularity, contextual autonomy, and deep cyber-physical integration; developing a hybrid SLAM model for navigation in sensor-deprived environments (a positioning error of 0.8m over 500m compared with 4.2m when using lidar alone); and developing an energy consumption model that optimizes fuel costs and battery degradation. As a result, typical confined spaces in the MMI have been systematized and requirements for the platforms have been formalized. It is demonstrated that the implementation of SAMPs can reduce occupational injuries in target operations by 70-90%, increase productivity by 15-25%, and reduce repair costs by 25-40%. The payback period for a fleet of five platforms is estimated at 2.5-3 years. The practical significance of the study lies in providing MMI enterprises with a structured methodology for transitioning to robotic execution of operations in confined spaces. Further development should include experimental validation using full-scale prototypes, development of self-learning algorithms for semantic defect analysis, and the establishment of industry-specific standards for data exchange with digital twins.

Keywords: mobile autonomous platform, confined space, mining and metallurgical industry, situation adaptivity, mathematical model, total cost of ownership, industrial safety

For citation

Pashko A.D., Velikanov V.S., Bulganina M.Yu. Development of the Concept of Situation-Adaptive Mobile Autonomous Platforms for Confined Spaces in the Mining and Metallurgical Industry. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 5-13. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-5-13>

Введение

Современный горно-металлургический комплекс (ГМК), оставаясь фундаментом экономики, сталкивается с комплексом взаимоусиливающих вызовов. Согласно данным Ростехнадзора, подземная добыча полезных ископаемых в России сохраняет один из наиболее высоких уровней профессионального риска: доля смертельного травматизма в данной отрасли в 2020–2022 годы в 3–5 раз превышала средние показатели по промышленности в целом. Параллельно с вызовами безопасности нарастает экономическое давление: эксплуатация глубоководных и геологически сложных месторождений ведет к росту себестоимости, а дефицит квалифицированных кадров для работы в опасных условиях становится критическим ограничителем развития.

Ключевым технологическим барьером является отсутствие эффективных средств для выполнения операций мониторинга, диагностики и ремонта в ограниченных и опасных пространствах (ОП), к которым относятся подземные выработки, технологические аппараты (доменные печи, конвертеры, бункеры-накопители) и инфраструктурные коммуникации [3]. Присутствие человека в таких контурах сопряжено с запредельным риском, а организация безопасного доступа требует масштабных производственных потерь, приводящих к значительным производственным потерям. По экспертным оценкам, совокупные потери времени, связанные только с процедурами обеспечения безопасного доступа персонала в «слепые зоны» и зоны повышенной опасности, могут достигать 20–30% от потенциально доступного фонда

рабочего времени на глубоких горизонтах. Таким образом, формируется системное противоречие: между объективной операционной необходимостью в постоянном контроле и вмешательстве в ОП и физической, экономической, а также технической невозможностью или крайней неэффективностью использования для этих целей традиционных методов.

Анализ существующих решений – от универсальных исследовательских роботов до специализированной автономной техники лидеров рынка (Sandvik, Epiroc) – показывает их недостаточную адаптацию к комплексным условиям ГМК [4-6].

Можно выделить следующие недостатки известных конструкций (существующих роботизированных решений), которые делают их недостаточно адаптированными к условиям ГМК:

1. Неустойчивость навигационных алгоритмов в динамических, запылённых и лишённых ориентиров средах (сенсорный вакуум). Как следствие, ошибка позиционирования при использовании только лидера достигает 4,2 м на 500 м, что неприемлемо для точных операций.

2. Отсутствие платформ, способных адаптировать свою морфологию под различные классы задач (модульность). Существующие решения, как правило, узкоспециализированы и не позволяют быстро менять конфигурацию для работы в разных типах ограниченных пространств (подземные выработки, технологические аппараты, инфраструктурные объекты).

3. Слабая интеграция роботов в контур цифрового двойника предприятия как равноправных киберфизических компонентов. Большинство систем работают изолированно, без двустороннего обмена данными с моделями среды и процессами планирования.

4. Недостаточная адаптация к комплексным условиям ГМК в целом, включая высокую запылённость, отсутствие GPS, динамические изменения среды (обвалы, подвижки грунта, изменение рельефа), экстремальные температуры (в технологических аппаратах до $>900^{\circ}\text{C}$), наличие токсичных и взрывоопасных газов.

5. Отсутствие платформ с гибридными энергосистемами (аккумулятор + генератор), оптимизирующими расход топлива и деградацию батареи для длительной автономной работы.

Неспособность эффективно выполнять задачи в «слепых зонах» и зонах повышенной опасности без предварительных масштабных подготовительных работ, что ведёт к высоким простоям оборудования (20–30% фонда времени).

Таким образом, основные претензии к известным конструкциям – это низкая точность навигации в сенсорном вакууме, отсутствие модульности и киберфизической интеграции, а также неадаптированность к специфическим опасностям горно-металлургического комплекса.

Целью данного исследования является разработка концептуальных основ, архитектуры и научно-методического аппарата, включая формальные моде-

ли, для проектирования мобильных автономных платформ нового поколения, способных к ситуационной адаптации для безопасного и эффективного выполнения задач в ограниченных пространствах ГМК.

Материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

В качестве методологического каркаса предложена концепция ситуационно-адаптивной мобильной платформы (САМП). Её суть – переход от создания изолированных, «закрытых» робототехнических устройств к проектированию открытой экосистемы модульных средств, конфигурируемых под конкретный класс пространств (ситуацию) и задачу (адаптивность).

Принципы и архитектура. Концепция базируется на трех взаимосвязанных принципах:

1. *Модульность*: платформа проектируется как сборка совместимых модулей: базового шасси (B), энергетического блока (P), центрального вычислительного модуля (C) и сменных модулей полезной нагрузки (M_i). Унифицированный интерфейс обеспечивает выполнение условия быстрой конфигурации. Критерий оптимальной конфигурации системы можно выразить формулой

$$C_{\text{опт}} = \operatorname{argmin}[T(B + P + C + M_i) \rightarrow \text{Goal}], \quad (1)$$

где $C_{\text{опт}}$ – оптимальная конфигурация системы; argmin – оператор поиска аргумента, при котором выражение T достигает минимума (от англ. argument of minimum); B – затраты на создание базового шасси; P – затраты на создание энергетического блока; C – затраты на создание центрального вычислительного модуля; M_i – затраты на создание сменных модулей полезной нагрузки; Goal – целевая установка (желаемый результат, критерий оптимизации).

2. *Контекстная автономность*: автономность понимается как способность системы к семантическому пониманию среды и перепланированию на основе иерархии целей:

$$G = \{G_{\text{стратег}}, G_{\text{такт}}, G_{\text{реакт}}\}, \quad (2)$$

где G – вектор целей/задач системы управления; $G_{\text{стратег}}$ – стратегический уровень целей (долгосрочные задачи, глобальные маршруты, бизнес-показатели); $G_{\text{такт}}$ – тактический уровень (среднесрочное планирование: маршруты, приоритеты, распределение ресурсов); $G_{\text{реакт}}$ – реактивный уровень (оперативное реагирование на изменения среды: обход препятствий, коррекция движения).

Управление реализуется по гибридной схеме «Human-on-the-Loop», где оператор задает стратегические цели и ограничения $G_{\text{стратег}}$, а тактическое $G_{\text{такт}}$ и реактивное $G_{\text{реакт}}$ планирование делегируются бортовому искусственному интеллекту (ИИ). Роль человека-оператора и бортового ИИ в схеме «Human-on-the-

Loop» сводится к следующему:

- Человека-оператор:
 - задаёт *стратегические рамки* (например, «доставить груз в точку X за 2 ч с минимальным энергопотреблением»);
 - контролирует безопасность и соответствие целям;
 - вмешивается только при нештатных ситуациях или смене стратегии.
- Бортовой ИИ:
 - самостоятельно формирует *тактические планы* (например, выбор пути с учётом текущих препятствий);
 - обеспечивает *реактивное управление* (мгновенная коррекция траектории, стабилизация платформы);
 - адаптируется к динамическим изменениям среды без участия оператора.

Преимуществами такого подхода являются снижение нагрузки на оператора, повышение скорости реакции на внештатные ситуации, сохранение человеческого контроля над ключевыми решениями, баланс между автономностью и управляемостью системы.

3. *Глубокая киберфизическая интеграция*: САМП выступает как активный агент $A_{\text{робот}}$ в системе цифрового двойника предприятия. Обеспечивается двусторонний обмен данными по следующим принципам:

- Обновление цифрового двойника:

$$DT(t + \Delta t) = f\left(DT(t), \sum Data(A_{\text{робот}})\right), \quad (3)$$

где $DT(t)$ – состояние цифрового двойника в момент времени t ; Δt – шаг моделирования/обновления; $\sum Data(A_{\text{робот}})$ – агрегированные данные, поступающие от робота (телеметрия, сенсорные данные, статус задач); f – функция эволюции состояния цифрового двойника (моделирует динамику системы с учётом входных данных).

- Формирование команд для робота:

$$Cmd(A_{\text{робот}}) = g(DT, Goal), \quad (4)$$

где $Cmd(A_{\text{робот}})$ – команды управления, передаваемые роботу; DT – актуальное состояние цифрового двойника (включая прогнозные сценарии); $Goal$ – целевые установки (задачи миссии, ограничения, приоритеты); g – функция принятия решений (на основе анализа DT и целей).

САМП действует как автономный агент $A_{\text{робот}}$, интегрированный в цифровую экосистему предприятия [8]. Цифровой двойник (ЦД) выполняет роль виртуального репрезентанта физической системы, объединяя данные от роботов, оборудования и процессов. Двусторонний обмен обеспечивает прямую связь (робот передаёт данные в ЦД для актуализации моде-

ли) и обратную связь (ЦД генерирует команды для робота на основе анализа ситуации и целей) [8].

Робот отправляет в ЦД структурированные данные (координаты и ориентацию, параметры работоспособности (температура, заряд, нагрузки), информацию об окружающей среде (препятствия, изменения ландшафта) и на этом этапе производится агрегация данных. На основе $DT(t)$ и данных робота система проводит прогностическое моделирование, прогнозируя эволюцию состояния ($DT(t+\Delta t)$), выявляет риски (столкновения, перегрузки) и оптимизирует ресурсы (энергия, время). На основе результатов моделирования функция g формирует управляющие воздействия (корректировку маршрута, изменение режимов работы, активацию аварийных процедур).

Преимуществами интеграции являются повышение ситуационной осведомлённости за счёт объединения данных, возможность предиктивного управления (предвосхищение проблем), масштабируемость (подключение множества агентов $A_{\text{робот}}$ к единому ЦД), снижение нагрузки на оператора (автоматизированная координация).

Математические модели ключевых подсистем. Модель навигации в условиях сенсорного вакуума. Для позиционирования в отсутствие GPS предлагается гибридная модель по методу одновременной локализации и построению карты (SLAM) (от англ. Simultaneous Localization and Mapping), объединяющая данные от лидара, стереокамеры и инерциального измерительного блока (IMU) (от англ. Inertial Measurement Unit) [9].

Состояние системы в дискретный момент k описывается вектором:

$$x_k = \begin{bmatrix} p_k \\ q_k \\ v_k \\ \omega_k \\ m \end{bmatrix}^T, \quad (5)$$

где p_k – позиция (координаты в 3D-пространстве); q_k – ориентация, заданная кватернионом (четырёхмерный вектор $[q_0, q_1, q_2, q_3]^T$ нормированный: $\|q_k\|=1$); v_k – линейная скорость; ω_k – угловая скорость; m – карта ориентиров (набор точек/объектов с известными координатами в глобальной системе).

На основе показаний IMU (u_k – вектор измерений акселерометров и гироскопов) состояние прогнозируется:

$$x_{k|k-1} = f(x_{k-1}, u_k) + w_k, \quad (6)$$

где $x_{k|k-1}$ – предсказанное состояние в момент k на основе данных до $k-1$; f – нелинейная функция пере-

хода, интегрирующая ускорения и угловые скорости (например, с использованием кватернионной кинематики и численного интегрирования) [4]; w_k – шум процесса (гауссовский, с ковариацией Q_k), учитывающий погрешности модели и датчиков.

Корректировка предсказания выполняется по данным лидара (камеры) (z_k):

$$z_k = h(x_{k|k-1}) + v_k, \quad (6)$$

где z_k – вектор наблюдений (например, расстояния до ориентиров, пиксельные координаты объектов); h – функция проецирования состояния в пространство измерений (учитывает модель камеры, лидара и геометрию сцены)[6]; v_k – шум измерений (гауссовский, с ковариацией R_k).

Модель энергопотребления и автономности. Время работы системы T_w определяется запасом энергии в батарее E_b и суммарным энергопотреблением:

$$E_b = \int_0^{T_w} (P_m(t) + P_c(t) + P_p(t)) dt, \quad (7)$$

где $P_m(t)$ – мощность, затрачиваемая на движение; $P_c(t)$ – мощность вычислительного модуля; $P_p(t)$ – мощность полезной нагрузки.

Мощность, необходимая для движения, зависит от кинематических и динамических параметров:

$$P_m = k_1 \cdot v^3 + k_2 \cdot m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot v, \quad (8)$$

где V – скорость движения, м/с; m – масса платформы, кг; g – ускорение свободного падения (9,81 м/с²); α – угол уклона поверхности, рад; k_1 , k_2 – коэффициенты, учитывающие аэродинамическое сопротивление и механические потери.

Физический смысл слагаемых: $k_1 \cdot v^3$ – энергия на преодоление аэродинамического сопротивления (пропорциональна кубу скорости); $k_2 \cdot m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot v$ – энергия на подъём/спуск по уклону (пропорциональна силе тяжести и скорости).

Для гибридной энергосистемы (аккумулятор + генератор) затраты на энергию C_e за путь длиной L минимизируются и определяются как

$$C_e = \min_{v_i, P_g(t)} \left[c_f \cdot \int_0^T P_g(t) dt + c_b \cdot \Delta DOD \right], \quad (9)$$

где c_f – стоимость топлива, руб./Вт·ч; $P_g(t) dt$ – мощность генератора в момент t , Вт; c_b – удельная стоимость деградации аккумулятора, руб./%; ΔDOD

– глубина разряда (% от номинальной ёмкости), влияющая на срок службы батареи [12].

Модель позволяет планировать работы с минимизацией затрат на топливо и замену аккумуляторных батарей (АКБ), адаптировать скорость $v(t)$ под рельеф (α) и нагрузку, балансировать между использованием генератора и АКБ для продления срока службы батареи, оценивать экономическую эффективность гибридных энергосистем в сравнении с чисто аккумуляторными.

К примеру, для транспортировки груза по маршруту длиной $L=10$ км с подъемами и спусками под уклоном $\alpha=5^\circ$ система оптимизирует скорость $v(t)$, снижая её на подъёмах для уменьшения P_m , мощность генератора $P_g(t)$, активируя его только при глубокой разрядке АКБ ($\Delta DOD > 70\%$). В результате удастся достигнуть снижения затрат на энергию C_e на 15–20% по сравнению с фиксированным режимом работы.

Методы проектирования и испытаний. Верификация концепции и алгоритмов осуществляется через цикл:

– *виртуальное моделирование в цифровых двойниках* на основе игровых движков (Unity, Unreal Engine) с физическими плагинами (NVIDIA PhysX). Создаются высокодетализированные модели типовых сред ГМК с параметризуемыми помехами (запыленность, освещенность);

– *аппаратно-программное моделирование* на масштабных прототипах в условиях лабораторных стендов «искусственная шахта» и «термобарокамера»;

– *полевые испытания* на действующих промышленных объектах по регламентированным протоколам.

Краткое описание базовой конструктивной схемы САМП.

Платформа построена по модульному принципу и состоит из следующих основных унифицированных узлов:

- Базовое шасси (В) – гусеничное (либо колёсное) исполнение с независимой подвеской, обеспечивающее:
 - клиренс не менее 200 мм для преодоления завалов и порогов;
 - угол преодолеваемого подъёма до 35° ;
 - степень защиты IP67 (полная пыленепроницаемость, защита от погружения в воду);
 - рабочий диапазон температур от -40 до $+120^\circ\text{C}$ (для версии без термоизоляции).
- Энергетический блок (Р) – гибридная система:
 - литий-железо-фосфатная аккумуляторная батарея (ёмкость 10–20 кВт·ч) с системой управления (BMS);
 - газовый (или дизельный) генератор мощностью 5–10 кВт для подзарядки на длительных маршрутах и питания полезной нагрузки;
 - топливный бак объёмом 15–30 л.
- Центральный вычислительный модуль (С) – промышленный контроллер реального времени (Intel Core i5/i7 industrial или ARM-базированный с аппаратным ускорителем AI);

- объём оперативной памяти 16–32 ГБ;
- твердотельный накопитель 1 ТБ для хранения карт и телеметрии;
- интерфейсы: Gigabit Ethernet, CAN, RS-485, Wi-Fi 6, 4G/5G.

• Сменные модули полезной нагрузки (Mi) – быстросъёмные (байонетное или магнитное крепление) блоки с единым электрическим и коммуникационным интерфейсом. Предусмотрены типовые исполнения:

- диагностический – лазерный сканер, газоанализатор, тепловизор;
- транспортный – грузовая платформа грузоподъёмностью до 200 кг;
- ремонтный – манипулятор с двумя степенями свободы и сменными рабочими органами;
- аварийно-спасательный – лебёдка, раздвижные опоры.

• Сенсорная система (входит в состав шасси и вычислительного модуля):

- 2× лидара (LIDAR) – основной и резервный (дальность 30–50 м, угол 270°);
- 2× стереокамеры (RGB+инфракрасная подсветка) для работы в полной темноте;
- инерциальный измерительный блок (IMU) – акселерометр, гироскоп, магнитометр;
- датчики давления, температуры, влажности окружающей среды.

• Система безопасности – многоуровневая (аппаратно-программная):

- аварийный останов (E-Stop) с дублированием по радио;
- бамперы и лазерные сканеры безопасности (зонная защита);
- автоматическая диагностика и переход в safe-mode при потере связи.

Все модули имеют единый механический, электрический и информационный интерфейс, что позволяет собрать платформу под конкретную задачу за 15–30 мин без специального инструмента. Габариты базового шасси (без нагрузки) – не более 1200×800×600 мм, масса – 250 кг (в транспортном исполнении – до 450 кг).

Данная конструктивная схема обеспечивает конфигурируемость, ремонтпригодность и масштабируемость, заложенные в концепцию САМП, и служит основой для последующего инженерного проектирования и изготовления опытного образца.

Полученные результаты и их обсуждение

Систематизация ограниченных пространств и формализация требований. В результате анализа производственного цикла ГМК разработана классификация типовых ОП (табл. 1). На её основе методом экспертных оценок и анализа функциональных отказов (FMEA) (от англ. Failure Modes and Effects Analysis) формализована система требований к САМП. Критическим требованиям, таким как точ-

ность навигации ± 10 см для операций точного позиционирования, присвоен наивысший приоритет (RPN > 200) в рамках методологии FMEA.

Таблица 1. Классификация ограниченных пространств горно-металлургического комплекса и целевые показатели для мобильной автономной платформы

Table 1. Classification of confined spaces in the mining and metallurgical industry and target performance indicators for a mobile autonomous platform

Класс пространств	Примеры	Характерные опасности
Подземные выработки	Штреки, забон, шурфы	Обрушение, загазованность, стесненные условия
Технологические аппараты	Печи, бункера, газоходы	Экстремальная температура (>900°C), токсичные газы, зависания материалов
Инфраструктурные объекты	Тоннели, коллекторы, трубопроводы	Затопление, загазованность, протяженность
Зоны геологических нарушений	Заколы, погашенные выработки	Нестабильность массива, высокий риск обрушения

Сравнительный анализ и оценка экономической эффективности. Анализ мирового опыта позволил количественно оценить преимущества автономных систем.

Основное преимущество предлагаемой концепции САМП над существующими системами (включая решения Sandvik, Epiroc и универсальные исследовательские роботы) заключается в комплексном преодолении ключевых научно-технических пробелов, а именно:

1. *Адаптивность к сенсорному вакууму и запылённости.* Разработан гибридный алгоритм SLAM (лидар + стереокамера + IMU + коррекция по магнитным аномалиям), который снижает ошибку позиционирования с 4,2 до 0,8 м на 500 м по сравнению с использованием только лидара. Это обеспечивает точность, необходимую для автономных транспортных и диагностических операций.

2. *Модульность и контекстная автономность.* В отличие от узкоспециализированных роботов, САМП построена на принципе сменных модулей полезной нагрузки (унифицированный интерфейс), что позволяет быстро перенастраивать платформу под разные классы ограниченных пространств (подземные выработки, технологические аппараты, инфраструктура). Иерархическая система целей и схема «Human-on-the-Loop» делегируют тактическое и реактивное управление бортовому искусственному интеллекту, снижая нагрузку на оператора и ускоряя реакцию на нештатные ситуации, при этом сохраняя стратегический контроль человека.

3. *Глубокая киберфизическая интеграция с цифровым двойником предприятия.* САМП выступает

как активный агент, постоянно обновляющий состояние цифрового двойника и получающий от него команды. Это позволяет осуществлять предиктивное управление, динамическое перепланирование и раннее выявление рисков (столкновения, перегрузки) в масштабе всего парка платформ.

4. *Оптимизация энергопотребления и совокупной стоимости владения.* Предложена модель энергозатрат, учитывающая не только движение, но и стоимость деградации аккумулятора и топлива. Для гибридной системы (АКБ + генератор) это позволяет снизить эксплуатационные расходы на 15–20% по сравнению с фиксированными режимами. Комплексная оценка TCO (Total Cost of Ownership) (по формуле (10)) и экономического эффекта показывает окупаемость парка из 5-ти платформ за 2,5–3 года при снижении травматизма на 70–90%, росте производительности на 15–25% и сокращении затрат на ремонт на 25–40%.

Таким образом, главное преимущество – переход от изолированных роботизированных устройств к открытой экосистеме модульных, самоадаптирующихся платформ, глубоко интегрированных в цифровую среду предприятия, что впервые позволяет безопасно и экономически эффективно решать задачи в самых опасных и теснённых условиях ГМК.

Внедрение автономных систем на ряде предприятий привело к: повышению производительности на 22%, снижению расхода топлива на 13%, уменьшению затрат на оплату труда операторов на 30–40%. На основе этих данных и предложенной архитектуры САМП проведена оценка совокупной стоимости владения TCO. Для парка из N модульных платформ TCO за срок службы T лет оценивается как

$$TCO(N, T) = N \cdot \left(C_{capex} + \sum_{t=1}^T \frac{C_{opex}(t) + C_{maint}(t)}{(1+r)^t} \right) - \sum_{t=1}^T \frac{\Delta B(t)}{(1+r)^t}, \quad (10)$$

где $TCO(N, T)$ – совокупная стоимость владения (Total Cost of Ownership) для N единиц оборудования за период T лет; C_{capex} – капитальные затраты на единицу; C_{opex} – операционные затраты (энергия, связь); C_{maint} – затраты на техническое обслуживание

и ремонт; r – ставка дисконтирования; $\Delta B(t)$ – экономический эффект (выгода, бенефиты) от эксплуатации парка платформ в году (снижение потерь от простоев, экономия на зарплате, снижение штрафов); t – номер года в горизонте планирования; T – расчётный период жизненного цикла.

Формула (10) позволяет оценить чистую приведённую стоимость владения парком из N платформ за срок T , учитывая капитальные вложения, текущие издержки, ремонты и экономический эффект, с учётом временной стоимости денег (дисконтирования по ставке r).

Моделирование для $N=5$, $T=7$ лет показывает, что при достижении планируемых показателей эффективности (снижение простоев на 25%, экономия энергии на 20%) срок окупаемости проекта составляет 2,5–3 года.

Результаты имитационного моделирования навигации. Тестирование гибридного алгоритма SLAM в цифровом двойнике протяжённого тоннеля (длина 500 м) с имитацией периодической запыленности показало следующее:

- при использовании только лидара (Velodyne VLP-16) накопленная ошибка позиционирования к концу тоннеля составила $\varepsilon_{\text{лид}} = 4,2$ м (только лидар);
- при использовании предложенной гибридной схемы (лидар + визуальные метки + IMU с коррекцией по магнитным аномалиям) ошибка не превышала $\varepsilon_{\text{гибрид}} = 0,8$ м.

Данные подтверждают необходимость мультисенсорного подхода для выполнения требования точности ± 1 м для транспортных операций.

Социально-экономический эффект. Потенциальный эффект от масштабного внедрения парка САМП на предприятии ГМК с годовым оборотом от \$1 млрд может включать (табл. 2):

- снижение затрат – прямая экономия на оплате труда и снижение страховых премий за счет устранения персонала из опасных зон;
- рост доходов – увеличение выпуска продукции за счет сокращения внеплановых простоев на 25–35% и оптимизации технологических циклов;
- нематериальные преимущества – повышение капитализации за счет роста ESG-рейтинга (от англ. Environmental, Social, and Governance).

Таблица 2. Оценка потенциального годового эффекта от внедрения парка САМП

Table 2. Assessment of the potential annual effect of implementing a SAMP fleet

Категория эффекта	Методика оценки	Потенциал, %	Примечание
Снижение травматизма	Сравнение LTIFR* до и после	70–90%	*Показатель частоты травм с потерей рабочего времени
Рост производительности	Анализ коэффициента использования оборудования	15–25%	За счет работы 24/7 и оптимизации маршрутов
Экономия энергии	Сравнение удельных расходов	15–20%	Алгоритмическая оптимизация режимов движения
Сокращение затрат на ремонт	Анализ переходов от аварийного к плановому ТО	25–40%	Предиктивная аналитика на основе данных МАП

Заключение

В результате проведенного исследования достигнута поставленная цель: разработаны концептуальные и научно-методические основы, подкрепленные формальными моделями и статистическими оценками, для создания нового класса мобильных автономных платформ для ГМК.

Научная новизна работы заключается:

- в формулировке и количественном обосновании системного противоречия в ГМК на основе анализа производственной статистики;
- в предложении концепции САМП, формализованной через принципы модульности, контекстной автономности и киберфизической интеграции;
- в разработке адаптированных математических моделей навигации (гибридный SLAM) и энергоэффективности для условий сенсорного вакуума и длительной автономности;
- в комплексной оценке совокупной стоимости владения (TCO) и потенциального экономического эффекта, демонстрирующих окупаемость проекта за 2,5–3 года.

Практическая значимость состоит в предоставлении предприятиям ГМК структурированной методологии перехода к роботизации работ в ОП – от первоначальной оценки целевых пространств и задач до выбора архитектуры и оценки экономики проекта. Предложенный модульный подход снижает риски и капитальные затраты на начальном этапе внедрения.

Перспективы дальнейших исследований связаны с экспериментальной валидацией предложенных моделей на полномасштабных прототипах, разработкой самообучающихся алгоритмов для семантического анализа дефектов, а также созданием отраслевых стандартов на интерфейсы обмена данными между МАП и системами цифровых двойников в рамках концепции Индустрии 4.0.

Список источников

1. Ростехнадзор. Статистические данные о производственном травматизме за 2020-2022 годы. URL: <https://www.gosnadzor.ru/> (дата обращения: 15.10.2023).
2. Правила по охране труда при работе в ограниченных и замкнутых пространствах (утв. приказом Минтруда России от 15 декабря 2020 г. N 902н).
3. Карпушин А.В., Фролов М.С. Экономика цифровой трансформации горного предприятия: оценка потерь от простоев // Горный журнал. 2022. № 5. С. 67–73.
4. Thrun S., Burgard W., Fox D. Probabilistic Robotics. MIT Press, 2005. 647 p.
5. Pfeiffer M., Haghani T. Robotics for Mining: A Systematic Literature Review and TCO Analysis // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2023, vol. 37, no. 3, pp. 189–215.
6. Khamis A., Jiang J. Sensor Fusion and SLAM in Industrial Environments: Challenges and Solutions // Journal of Industrial Information Integration. 2022, vol. 28, p. 100354.

7. Epiroc. Annual and Sustainability Report 2022: Driving Productivity and Sustainability. URL: <https://www.epiroc.com/> (дата обращения: 20.01.2026).
8. Sandvik. AutoMine® Benchmarking Study: Productivity and Cost Analysis. Internal Report Summary, 2021.
9. Головань В.И., Семенов Д.А. Моделирование динамики мобильного робота в средах со сложным рельефом // Инженерный вестник. 2021. № 4. С. 45–52.
10. Brooks R.A. A Robust Layered Control System for A Mobile Robot // IEEE Journal of Robotics and Automation. 1986, vol. RA-2, no. 1, pp. 14–23.
11. Патент RU 2704048 C1. МПК B25J 5/00 (2006.01) Модульная мобильная робототехническая платформа / Савельев А.И., Харьков И.Ю., Павлюк Н.А., Карпов А.А. Патентообладатель ФГБУН СПИИРАН, №2019105802, заявл. 28.02.2019, опубл. 23.10.2019.
12. Smith J., Chen L. Total Cost of Ownership (TCO) Analysis for Industrial Robotics / J. Smith, // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2023, vol. 79, pp. 102443.

References

1. Rostekhnadzor. Statisticheskie dannye o proizvodstvennom travmatizme za 2020-2022 gody [Statistical data on occupational injuries for 2020–2022]. Available at: <https://www.gosnadzor.ru/> (Accessed on October 15, 2023).
2. Occupational safety rules for work in confined and enclosed spaces. Approved by Order No. 902n of the Ministry of Labor of Russia dated December 15, 2020.
3. Karpushin A.V., Frolov M.S. Economics of digital transformation of a mining enterprise: assessment of downtime losses. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2022;(5):67-73. (In Russ.)
4. Thrun S., Burgard W., Fox D. Probabilistic Robotics. MIT Press, 2005, 647 p.
5. Pfeiffer M., Haghani T. Robotics for Mining: A Systematic Literature Review and TCO Analysis. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2023;37(3):189-215.
6. Khamis A., Jiang J. Sensor Fusion and SLAM in Industrial Environments: Challenges and Solutions. *Journal of Industrial Information Integration*. 2022;28:100354.
7. Epiroc. Annual and Sustainability Report 2022: Driving Productivity and Sustainability. Available at: <https://www.epiroc.com/> (Accessed on January 20, 2026).
8. Sandvik. AutoMine® Benchmarking Study: Productivity and Cost Analysis. Internal Report Summary, 2021.
9. Golovan V.I., Semenov D.A. Modeling the dynamics of a mobile robot in complex terrain environments. *Inzhenernyi vestnik* [Engineering Vestnik]. 2021;(4):45-52. (In Russ.)
10. Brooks R.A. A Robust Layered Control System for a Mobile Robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*. 1986; RA-2(1):14-23.
11. Saveliev A.I., Kharkov I.Yu., Pavlyuk N.A., Karpov A.A. *Modulnaya mobilnaya robototekhnicheskaya platforma* [Modular mobile robotic platform]. Patent RU, no. 2704048 C1, 2019.
12. Smith J., Chen L. Total Cost of Ownership (TCO) Analysis for Industrial Robotics. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2023;79:102443.

Пашко Алексей Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и компьютерных технологий,
Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.
Email: a.pashko@tu-ugmk.com. ORCID 0009-0008-3296-5014

Великанов Владимир Семенович – доктор технических наук,
профессор кафедры подъемно-транспортных машин и роботов,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия;
профессор кафедры автоматизации и компьютерных технологий,
Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.
Email: v.s.velikanov@urfu.ru. ORCID 0000-0001-5581-2733

Булганина Марина Юрьевна – кандидат технических наук,
доцент кафедры металлургических и роторных машин,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.
Email: marina.bulganina@urfu.ru. ORCID 0009-0009-7833-7846

Alexey D. Pashko – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Automation and Computer Technology,
Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.
Email: a.pashko@tu-ugmk.com. ORCID 0009-0008-3296-5014

Vladimir S. Velikanov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Hoisting and Hauling Machines and Robots,
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia;
Professor, Department of Automatics and Computer Technologies,
Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.
Email: v.s.velikanov@urfu.ru. ORCID 0000-0001-5581-2733

Marina Yu. Bulganina – PhD (Eng.), Docent, Department of Metallurgical and Rotary Machines,
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.
Email: marina.bulganina@urfu.ru. ORCID 0009-0009-7833-7846

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

УДК 622.765.4

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-14-24



ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ВТОРИЧНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ФЛОТИРУЕМОЙ ФРАКЦИИ В КОЛОННЫХ ФЛОТАЦИОННЫХ МАШИНАХ

Метелев А.А.^{1,2}, Закирничный В.Н.¹, Гарифулин М.Г.¹, Пургин А.П.¹, Морозов В.В.²

¹Научно-исследовательский и проектный институт обогащения и механической обработки полезных ископаемых АО «Уралмеханобр», Екатеринбург, Россия

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» Минобрнауки РФ, Москва, Россия

Аннотация. На основании результатов исследования разделения минеральных фракций в зоне транспортирования и вторичной концентрации пенного продукта выбраны подходы к решению задачи выбора режимных параметров высокоскоростной пневматической флотации медных руд. Целью проводимых исследований был выбор аэрогидродинамических параметров, обеспечивающих селективность флотации минералов. Новизна проведенных исследований заключается в использовании визиометрической методики, основанной на имитации разделяемых минералов люминофорами, позволяющими в динамическом режиме определять флотоактивность минеральных фракций. С применением новой методики установлены закономерности захвата и выноса в пенный продукт зерен гидрофильных минералов при варьировании расхода воздуха и концентрации вспенивателя. Результатами исследования процессов вторичной концентрации сфлотированных в пенный продукт медных минералов установлены зависимости аэрогидродинамических и технологических параметров пневматической флотации от расхода воздуха и концентрации вспенивателя в водной фазе. Показана возможность поддержания режимов высокоскоростной флотации, не вызывающих чрезмерный вынос зерен нерудных минералов различной крупности в пенный продукт в зоне транспортирования и вторичной концентрации. Результатами расчетов показано, что требуемая эффективность пенной флотации минералов меди достигается при удельном расходе воздуха не более $0,6 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ мин}$ и концентрации вспенивателя не более 50 мг/л . Для достижения требуемого результата – поддержания требуемого качества концентратов при высокоскоростной флотации – предложено изменить геометрические пропорции флотационной машины: увеличить в 1,5 раза отношение диаметров зоны транспортирования–вторичной флокуляции и зоны аэрации–флотации. Практическим результатом модернизации флотомашин КФМ-1400 путем увеличения диаметра верхней части корпуса стало увеличение ее производительности с 0,371 до 0,985 т/ч м^3 при сохранении требуемого качества медного концентрата.

Ключевые слова: медная руда, высокоскоростная флотация, пена, аэрофлокулы, вторичная концентрация, вспениватель, люминофоры, визиометрический анализ, гидрофильные минералы

© Метелев А.А., Закирничный В.Н., Гарифулин М.Г., Пургин А.П., Морозов В.В., 2026

Для цитирования

Исследование и оптимизация процессов вторичной концентрации флотируемой фракции в колонных флотационных машинах / Метелев А.А., Закирничный В.Н., Гарифулин М.Г., Пургин А.П., Морозов В.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 14-24. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-14-24>



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

STUDY AND OPTIMIZATION OF SECONDARY CONCENTRATION PROCESSES OF THE FLOTATED FRACTION IN COLUMN FLOTATION MACHINES

Metelev A.A.^{1,2}, Zakirnichny V.N.¹, Garifulin I.F.¹, Purgin A.P.¹, Morozov V.V.²

¹ Scientific Research and Design Institute of Mineral Processing and Mechanical Processing “Uralmekhanobr”, JSC, Yekaterinburg, Russia

² The National University of Science and Technology MISIS, the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Moscow, Russia

Abstract. Based on the results of studying the separation of mineral fractions in the transport and secondary concentration zone of the froth product, approaches to selecting operating parameters for high-rate pneumatic flotation of copper ores have been developed. The aim of the research is to determine the aerohydrodynamic parameters that ensure the selectivity of mineral flotation. The novelty of the study lies in the use of a visometric technique based on simulating the minerals being separated with luminophores, which makes it possible to determine the floatability of mineral fractions under dynamic conditions. Using the proposed technique, the patterns of capture and entrainment of hydrophilic mineral grains into the froth product have been established as a function of air flow rate and frother concentration. The study of the secondary concentration of copper minerals floated into the froth product has established relationships between the aerohydrodynamic and technological parameters of pneumatic flotation and the air flow rate and frother concentration in the aqueous phase. The possibility of maintaining high-rate flotation conditions without excessive entrainment of non-metallic mineral grains of various sizes into the froth product in the transport and secondary concentration zone has been demonstrated. The calculations have shown that the required efficiency of froth flotation of copper minerals is achieved at a specific air flow rate of no more than 0.6 m³/m² min and a frother concentration of no more than 50 mg/L. To achieve the required result such as maintaining the required concentrate quality under high-rate flotation conditions it has been proposed to modify the geometric proportions of the flotation machine by increasing the ratio of the diameters of the transport-secondary flocculation zone to the aeration-flotation zone by a factor of 1.5. The practical result of modernizing the KFM-1400 flotation machine by increasing the diameter of the upper part of the housing is an increase in its capacity from 0.371 to 0.985 t/h m³ while maintaining the required quality of the copper concentrate.

Keywords: copper ore, high-rate flotation, froth, aeroflocs, secondary concentration, frother, luminophores, visometric analysis, hydrophilic minerals

For citation

Metelev A.A., Zakirnichny V.N., Garifulin I.F., Purgin A.P., Morozov V.V. Study and Optimization of Secondary Concentration Processes of the Flotated Fraction in Column Flotation Machines. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 14-24. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-14-24>

Введение

Преимущества процесса пневматической флотации обусловили его развитие и широкое распространение на рудообогатительных фабриках [1, 2]. Зарубежные флотационные машины с пневматическими аэраторами успешно конкурируют и в ряде случаев вытесняют импеллерные флотационные машины, особенно при обогащении крупновкрапленных руд и материалов [3, 4].

Комбинированные пневматические флотомашины колонного типа, разработанные в АО «Уралмеханобр», предназначены для обогащения широкого спектра руд и техногенного сырья, включая труднообогатимые руды цветных металлов [5, 6]. Данное направление развития флотационной техники вполне актуально и применяется на предприятиях горнохимической отрасли [7, 8].

Пневматические флотационные машины конструктивно сочетают узлы и элементы высокоскоростных и традиционных колонных флотационных аппаратов. Рабочая зона пневматической флотационной машины включает два уровня аэрирования [5, 9]. В верхней части рабочей зоны корпуса флотомашины размещены аэрирующие устройства (эжекторы), обеспечивающие подачу в рабочую зону подготовленной к флотации пульповоздушной смеси, в которой формируются аэрофлокулы гидрофобных минералов. В нижней части машины располагают дополнительные аэраторы, выполненные, как правило, в виде перфорированных элементов. Во флотомашинах серии КФМ в верхней части рабочей зоны реализуются принципы пенной сепарации и флотогравитации, обеспечивающие вторичную концентрацию флотируемых минералов [6]. При этом нижняя часть рабочей зоны функционирует по принципу противоточной колонной флотации.

Важным условием достижения эффективности обогащения бедных медных руд является реализация высокоскоростных режимов пневматической флотации (высокоскоростной флотации), обеспечивающих существенное увеличение производительности флотационного передела на прежних площадях производственных цехов и, соответственно, снижение эксплуатационных затрат. Современная концепция эволюции флотационных машин, в том числе машин серии КФМ, предусматривает оптимизацию геометрических пропорций рабочих камер, в том числе выбор высоты и формы зоны транспортирования – вторичной концентрации и других конструктивных параметров, обеспечивающих увеличение их производительности без снижения качества получаемого концентрата [6, 8].

Для оптимизации размеров и пропорций рабочей камеры флотационных аппаратов необходимо принять во внимание особенности процесса вторичной концентрации, протекающего в зоне транспортирования пены. Образующиеся в процессе флотации аэрофлокулы проходят путь от зоны образования и минерализации до места разгрузки в пенный продукт (ПП) и подвергаются существенной реструктуризации из-за утончения гидратной прослойки, приводящей к схлопыванию и укрупнению воздушных пузырьков, составляющих их структурную основу [9, 10].

Одной из причин снижения качества флотационных концентратов при реализации режимов высокоскоростной флотации является механический вынос тонких фракций нерудных минералов с захватываемой образующимися в процессе флотации аэрофлокулами [10, 11]. Важной составляющей процесса вторичной концентрации является повышение содержания ценного компонента, достигаемое за счет оседания или вымывания зерен и шламов нерудных минералов в зоне транспортирования [12]. Практикой колонной флотации показано, что увеличение высоты зоны транспортирования приводит к повышению качества концентрата [2, 6]. Однако, как показано нашими исследованиями, чрезмерное увеличение высоты зоны транспортирования машины или скорости подъема пенного продукта снижает извлечение ценных компонентов и качество концентрата вследствие разрушения аэрофлокул с зернами рудных минералов [13].

Расход и концентрация вспенивателя в водной фазе пульпы являются важными параметрами, в существенной мере определяющими эффективность флотационного процесса. Недостаточная концентрация вспенивателя ведет к снижению устойчивости пены и, как следствие, к увеличению потерь флотированных минералов. Избыточная концентрация вспенивателя приводит к снижению качества концентрата за счет образования тонких и вязких пен, которые обуславливают существенный механический захват в пенный продукт нефлотированных минералов.

Важным условием выбора конструктивных параметров колонных флотационных машин является учет влияния существенных технологических параметров процесса флотации, таких как расход воздуха и концентрация вспенивателя, существенно влияющих на возможность удаления фракций нерудных минералов из пенного слоя [14]. Принципиальным подходом к выбору параметров гидроаэродинамического режима в зоне транспортирования – вторичной концентрации является обеспечение процесса снижения обводненности межпузырькового пространства за счет протекания процесса синерезиса – «стекания» межпузырьковой жидкости под действием гравитационных сил [15, 16].

Задачей настоящей работы являлось экспериментальное исследование влияния параметров флотационного процесса – расхода воздуха и концентрации вспенивателя – на захват зерен и шламов нерудных минералов в пенный продукт с водной фазой аэрофлокул и обратный процесс их удаления при протекании процессов вторичной концентрации в пенном продукте, обеспечивающих повышение технологических показателей процесса колонной флотации.

Методология и методики исследований

К общепринятым механизмам разрушения пены относятся: вытекание жидкости из пены (синерезис), обуславливающее утончение пленок без изменения объема пены; укрупнение больших ячеек пены и исчезновение маленьких из-за диффузии газа через пленки; разрыв пленок [15, 16]. Преобладание одного или другого механизма зависит от многих факторов, но во всех случаях фактором, снижающим устойчивость пены, является чрезмерное снижение толщины гидратного слоя вокруг воздушных пузырьков в аэрофлокулах [13, 17].

Для решения задачи определения оптимальных параметров процесса вторичной концентрации флотированных минералов в пенном продукте в работе [13] была выбрана гипотеза, связывающая содержание гидрофильных минеральных компонентов в пене с массовой долей воды в межпузырьковом пространстве.

Исследование характеристик и траекторий передвижения флотированных и нефлотированных минеральных частиц во флотационном процессе с использованием лабораторных флотационных установок затруднено ввиду непрозрачности флотационной пульпы и пены. Для определения аэрогидродинамических характеристик пены и исследования траекторий движения минеральных зерен в процессе флотации была разработана и применена специально спроектированная и изготовленная флотационная установка на базе известной конструкции, называемой «Трубка Халлимонда», с замкнутым циклом движения продуктов флотации, схема которой и изображение рабочей зоны представлены на **рис. 1**.

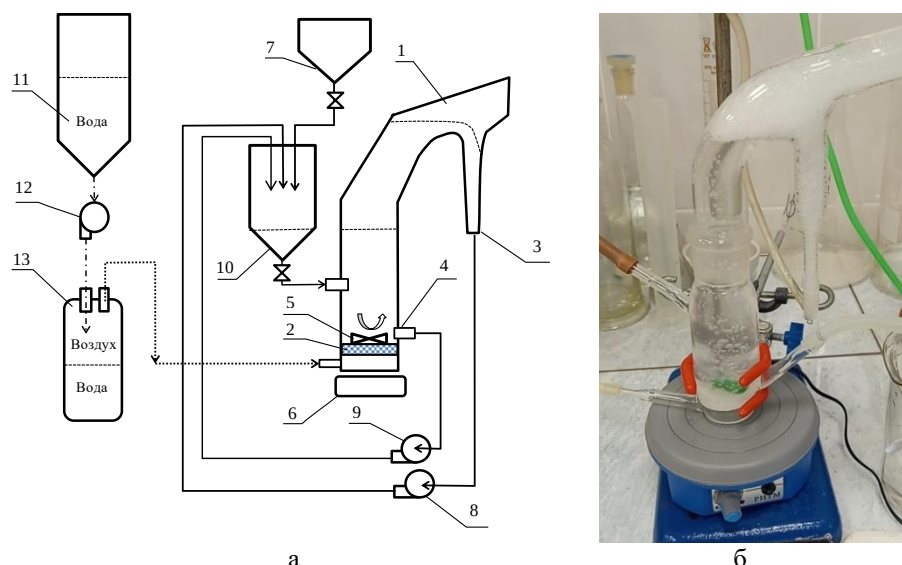


Рис. 1. Схема узлов (а) и изображение рабочей зоны (б) установки пенной флотации для исследования гидроаэродинамического режима: 1 – стеклянная флотокамера; 2 – пористая перегородка; 3 – разгрузочный патрубок пенного продукта; 4 – разгрузочный патрубок камерного продукта; 5 – магнитный элемент; 6 – магнитная мешалка; 7 – емкость загрузки питания флотации; 8 – перистальтический насос для перекачки пенного продукта; 9 – перистальтический насос для перекачки камерного продукта; 10 – приемник продуктов флотации; 11 – емкость с вытеснительной водой; 12 – насос-регулятор расхода вытеснительной воды; 13 – вытеснитель воздуха

Fig. 1. Schematic diagram of the units (a) and image of the working zone (б) of the froth flotation unit for studying the aerohydrodynamic regime: 1 is glass flotation cell; 2 is porous partition; 3 is froth product discharge nozzle; 4 is tailings product discharge nozzle; 5 is magnetic element; 6 is magnetic stirrer; 7 is flotation feed tank; 8 is peristaltic pump for transferring the froth product; 9 is peristaltic pump for transferring the tailings product; 10 is flotation product receiver; 11 is displacement water tank; 12 is displacement water flow control pump; 13 is air displacer

Опыты проводились при пенной флотации с переменным расходом воздуха и концентрации вспенивателя. Изменения расхода воздуха обеспечивали регулированием числа оборотов перистальтического насоса 12, перекачивающего воду из мерной емкости 13 в вытеснительную емкость 14. Изменение концентрации вспенивателя достигали добавкой реагента в водную фазу.

Применение замкнутого цикла с возвратом как сфлотированных минералов (пенного продукта), так и несфлотированных минералов (камерного продукта) в голову процесса позволяло достичь высокой стабильности процесса и сопоставимости результатов, получаемых при варьировании параметров процесса флотации, например расхода воздуха и концентрации вспенивателя.

При проведении исследований на начальном этапе была применена визиометрическая методика, позволяющая фиксировать концентрации, направление и траектории движения минеральных зерен в трехфазной системе твердое – жидкое – газ [13, 15, 18]. Для определения изменения структуры пенного слоя, концентрации и траекторий движения минеральных зерен использовали загрузки люминофоров-имитаторов флотируемых и нефлотируемых минералов, имеющих существенно устойчивые спектры люминесценции в видимом диапазоне при облучении ультрафиолетовым источником

[13]. При этом характеристики люминофоров, имитирующих флотируемые и нефлотируемые минералы, существенно различались, что давало возможность по интегральному спектру определить их соотношение в анализируемом материале. Применение разработанной методики позволяло фиксировать в пене отдельные зерна люминофоров, имитирующих флотируемые или нефлотируемые минералы, и определять траекторию и скорость их движения во флотационной пене.

Использование описанной выше флотационной установки с замкнутым циклом движения продуктов флотации позволяло фиксировать и анализировать результаты после достижения устойчивого протекания флотационного процесса.

Технологические исследования, ставившие задачу оценки эффективности выбранных подходов к модификации конструкций флотационных аппаратов, проводились на серийных флотационных машинах КФМ-1400 и КФМ-1400ВМГ на медных рудах ГОКов АО «Святогор».

Обсуждение полученных результатов

Исследования влияния расхода воздуха на селективность процесса флотации. На начальном этапе исследований были поставлены эксперименты, ставящие целью установления влияния расхода воз-

духа во флотационную установку на селективность флотации. С целью получения информации о поведении флотируемых минералов в различающихся режимах аэрации была применена изображенная на **рис. 1** флотационная установка с замкнутым циклом движения продуктов флотации. Анализ флотационного процесса проводили с применением визиометрической методики с использованием твердых люминофоров-имитаторов флотируемых и нефлотируемых рудных минералов.

В качестве имитаторов минералов использовали люминофоры Э-515-115 и ЭЛ-570М (сульфиды цинка и кадмия, активированные ионами меди и серебра) [19]. Для перевода люминофора Э-515-115 во флотируемую форму применяли его обработку в растворе медного купороса с концентрацией 63 мг/л и последующую гидрофобизацию в растворе бутилового ксантогената с концентрацией 100 мг/л. Люминофор ЭЛ-570 такой обработке не подвергался и сохранял гидрофильность поверхности. Люминофор Э-455-115 обладает фотолюминесценцией с максимумом длины волны 455 нм (синее свечение), люминофор ЭЛ-570М – фотолюминесценцией с максимумом длины волны 570 нм (желтое свечение). При исследовании применяли фракции люминофоров крупностью от 25 до 80 мкм.

При помощи фотосъемки и последующего визиометрического анализа определяли относительную

концентрацию минеральных зерен в рабочей зоне и пенном слое (**рис. 2, б**). Анализ изображений показывает, что при флотации смеси люминофоров Э-570М и Э-455-115 в зоне флотации (участок 2 на **рис. 2, в**) регистрируется зеленое свечение, представляющее собой смешенное излучение от обоих люминофоров. В пенном слое (участок 3 на **рис. 2, в**) и в разгрузочном патрубке (участок 3 на **рис. 2, г**) пенного продукта регистрируется синее свечение, характерное флотируемому люминофору Э-455-115.

Соотношение люминофоров в узлах флотационной установки определяли по результатам спектрального анализа изображений. Расчеты проводили путем предварительного преобразования цветовых характеристик анализируемого участка из формата RGB (красное – голубое – синее) в формат HSL (цветовой оттенок, насыщенность, яркость) (**рис. 3**). Результаты визиометрического анализа, проведенного с использованием программного пакета XnView и приведенного ниже уравнения для расчета длины волны максимума излучения $\nu_{\max}$ по цветовому оттенку H , град,

$$\nu_{\max} = -0,73 \cdot H + 621,$$

позволили определить цветовые характеристики участков с различным соотношением флотируемого и нефлотируемого имитатора.

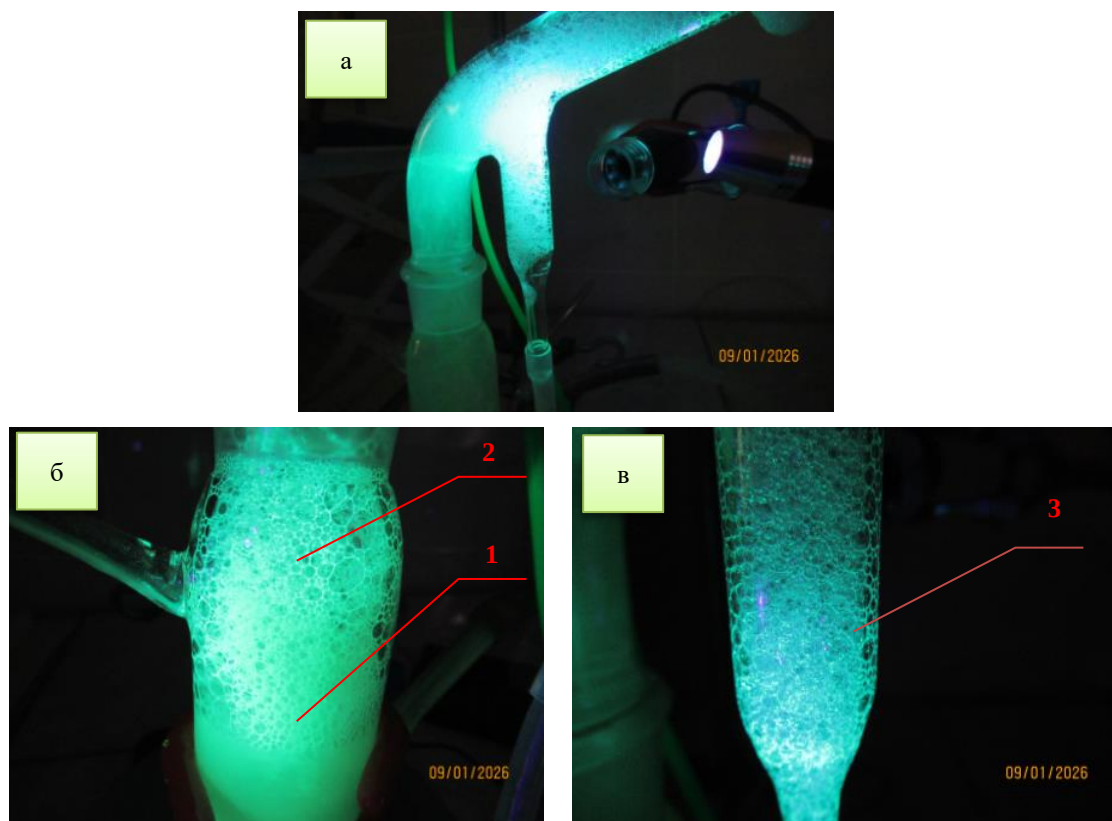


Рис. 2. Изображения флотационной установки (а), рабочей зоны (б) и патрубка разгрузки пенного продукта (в) в ультрафиолетовом освещении, где 1, 2, 3 – участки для спектрального анализа по **табл. 1**

Fig. 2. Images of the flotation unit (a), working zone (б), and froth product discharge nozzle (в) under ultraviolet illumination, where 1, 2, and 3 are areas used for spectral analysis according to Table 1

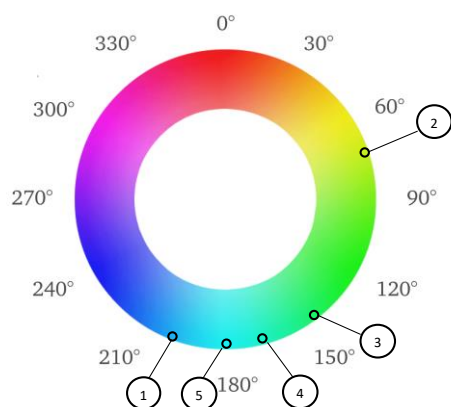


Рис. 3. Представление цветового оттенка люминофоров и результатов анализа изображений на рис.2 на цветовом круге формата HSL: 1 –люминофор Э-455-115; 2 – люминофор ЭЛ-570М; 3 – нижняя часть зоны флотации – камерный продукт, 4 – верхняя часть зоны флотации – пенный продукт; 5 – пена в патрубке разгрузки

Fig. 3. Representation of the color hues of luminophores and results of image analysis shown in Fig. 2 on an HSL color wheel: 1 is E-455-115 luminophore; 2 is EL-570M luminophore; 3 is lower part of the flotation zone – tailings product; 4 is upper part of the flotation zone – froth product; 5 is froth in the discharge nozzle

Для расчета соотношения люминофоров в анализируемых продуктах использовали зависимость цветового оттенка H от соотношения люминофоров (см. рис. 3), построенную по данным табл. 1.

Таблица 1. Спектральные характеристики сигнала люминесценции смеси люминофоров при варьировании соотношения массовых долей компонентов и результаты анализа изображений

Table 1. Spectral characteristics of the luminescence signal of a luminophore mixture with varying mass fractions of the components and the results of image analysis

№ п/п	Массовая доля люминофоров, %		Координаты сигнала в RGB			Координаты сигнала в HSL			Длина волны максимума сигнала, нм
	Э-455-115	ЭЛ-570М	R	G	B	H	S	L	
Калибровка									
1	100	0	25	108	187	200	75,7	40,4	475,0
2	90	10	32	121	170	193	68,3	39,6	480,1
3	80	20	50	138	145	184	50,3	37,8	486,7
4	70	30	70	155	140	171	37,8	44,1	496,2
5	60	40	71	160	130	160	38,5	45,3	504,2
6	50	50	92	168	125	146	30,4	51	514,4
7	40	60	114	156	104	108	20,8	51	542,2
8	30	70	127	174	99	98	31,6	53,5	549,5
9	20	80	140	179	94	88	35,9	53,5	556,8
10	10	90	150	185	88	82	40,9	53,5	561,1
11	0	100	164	183	68	70	45,8	49,2	570,0
Результаты анализа изображений на рис. 2									
1	Нижняя часть рабочей зоны		29	137	79	148	65,1	32,5	513
2	Верхняя часть рабочей зоны		40	147	125	168	57,2	36,7	498,3
3	Пенный продукт в точке разгрузки		49	157	181	191	57,4	45,1	481,6

Полученные результаты исследований позволили измерить влияние расхода воздуха и концентрации вспенивателя на характеристики пенного продукта. Как видно из рис. 4, а, увеличение расхода воздуха вызывает существенное увеличение выхода и относительной доли в пенном продукте нефлотируемого материала – люминофора ЭЛ-570. Увеличение концентрации вспенивателя также приводит к повышению массовой доли нефлотируемого компонента в пенном продукте (рис. 4, б).

Таким образом, результаты визиометрического анализа по разработанной методике с применением люминофоров позволили установить количественные зависимости механического захвата и загрязнения пенного продукта нефлотируемыми минералами. Полученные результаты устанавливают причины снижения качества концентрата и обосновывают необходимость корректировки режимов скоростной пневматической флотации в части выбора расхода воздуха и концентрации вспенивателя, не вызывающих увеличения механического выноса в пенный продукт нерудных минералов.

Исследование влияния расхода воздуха и концентрации вспенивателя на изменение параметров пены и технологических показателей флотации медной руды. Исследование влияния расхода воздуха на параметры пены и технологические показатели флотации медной руды проводили на пробе медной руды с использованием вышеописанной флотационной установки. Флотируемая руда Волковско-го месторождения относится к классу медно-магнетитовых (табл. 2) и характеризуется высокой массовой долей глинистых минералов, что обуславливает снижение качества медного концентрата.

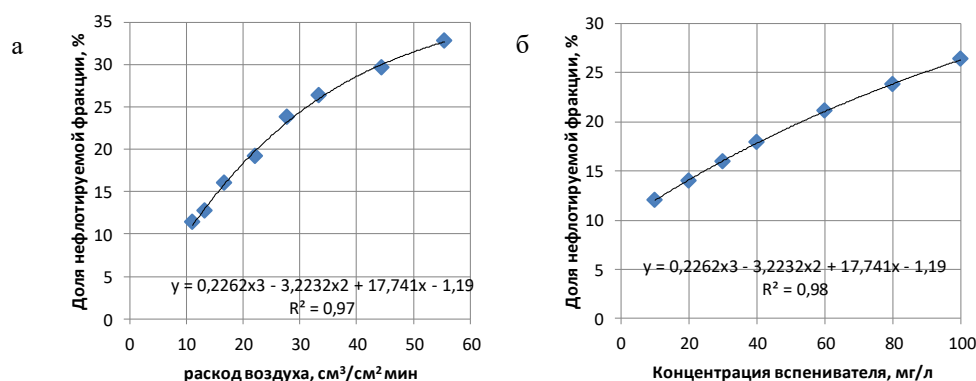


Рис. 4. Зависимость относительной доли нефлотируемой фракции (люминофора ЭЛ-570М) в пенном продукте от расхода воздуха (а) и концентрации вспенивателя (б) по данным визиометрического анализа

Fig. 4. Dependence of the relative fraction of the non-floatable fraction (EL-570M luminophore) in the froth product on the air flow rate (a) and frother concentration (б), based on visometric analysis data

Таблица 2. Минеральный состав пробы руды Волковского месторождения

Table 2. Mineral composition of the ore sample from the Volkovsky deposit

Минералы	Массовая доля, %
Вторичные минералы меди (ковеллин, борнит, халькозин)	0,4
Халькопирит	0,2
Оксисленные минералы меди (хризоколла, малахит)	0,2
Пирит	0,1
Магнетит	13,8
Амфиболы	5,9
Пироксены	33,8
Полевые шпаты	22,5
Апатит	9,4
Клинохлор	8,0
Слюда	3,0
Кальцит	2,1
Прочие	0,6

При проведении флотационных опытов исходную навеску измельченной руды в виде пульпы с плотностью 30% твердого загружали в дозатор и подавали в рабочую зону флотокамеры. После стабилизации процесса флотации проводили отбор пробы пенного продукта. Выгрузку пены проводили путем перенаправления потока пенного продукта из перистальтического насоса в течение 30 с в приемник – фарфоровую чашку. Отобранную пробу взвешивали до и после удаления влаги высушиванием. По разности массы исходной и высушенной пробы рассчитывали массу удаленной воды. По массе водной и твердой фазы рассчитывали плотность водно-минеральной фазы пенного продукта (отношение массы твердого к массе пенного продукта). По расходу воздуха и объему водной фазы рассчитывали кратность пены (отношение объема воздуха к объему воды, В:Ж).

Отобранная твердая фаза после истирания анализировалась на содержание меди методом рентгенофлуоресцентного анализа. По значениям выхода твердой фазы в пробе и содержания меди в пробе и исходной руде рассчитывалось извлечение меди в пенный продукт.

Результаты анализа показателей флотации показали, что при увеличении расхода воздуха наблюдается увеличение выхода пенного продукта и его обводненности (снижение плотности). Изменение технологических показателей состоит в увеличении выхода пенного продукта, повышении извлечения меди и снижении содержания меди в пенном продукте (табл. 3). Причиной таких результатов является увеличение скорости подъема пены, сокращение времени пребывания аэрофлокул в зоне транспортирования – вторичной концентрации и, соответственно, меньшая интенсивность удаления зерен и шламов нерудных минералов за счет стекания водной фазы из аэрофлокул. Повышение извлечения медных минералов обусловлено заметным ослаблением деструкции пены и снижением выпадения ее сrostков флотируемых минералов.

Результаты расчетов показали, что эффективность пенной флотации минералов меди существенно уменьшается при удельном расходе воздуха более 0,6 м³/м² мин. Выбор оптимального режима по расходу воздуха будет определяться технико-экономическим анализом, сравнивающим потери от качества концентрата со стоимостью дополнительно извлекаемой меди. При наличии «запаса» по качеству концентрата вполне целесообразно использовать режим скоростной флотации с повышенным расходом воздуха, обеспечивающий повышение извлечения меди на 6,4–10,4%.

Расход и концентрация вспенивателя также являются важными параметрами флотационного процесса, требующими непрерывной корректировки. Результаты анализа показателей флотации медной руды при варьировании концентрации вспенивателя в водной фазе показали ее существенное влияние на аэрогидродинамические и технологические показатели. Так, увеличение концентрации вспенивателя повышает обводненность пенного продукта и скорость подъема, уменьшает продолжительность его пребывания в зоне транспортирования – вторичной концентрации. При этом наблюдается увеличение выхода пенного продукта, повышение извлечения меди и снижение содержания меди в концентрате (табл. 4).

Таблица 3. Параметры пенного продукта и показатели флотации медной руды в установке пенной флотации с замкнутым циклом движения продуктов флотации при варьировании расхода воздуха

Table 3. Froth product parameters and flotation performance indicators for copper ore in a froth flotation unit with a closed-loop circulation of flotation products at varying air flow rates

Удельный расход воздуха, см ³ /см ² ·мин	Выход пенного продукта, г	Масса твердого в ПП, г	Доля твердого в ПП, %	Скорость подъема ПП, см/мин	Массовая доля меди, %	Извлечение меди, %
11,1	2,57	0,93	36,19	12,4	15,4	73,4
13,3	2,85	0,95	33,33	14,8	15,3	74,5
16,7	3,07	0,97	31,60	19,4	15,1	75,1
22,2	3,44	1,05	30,52	24,5	14,4	77,5
27,8	3,56	1,13	31,74	30,5	13,7	79,4
33,3	3,98	1,25	30,41	38,0	12,9	81,8
44,4	4,79	1,38	28,81	48,8	12,2	82,8
60,1	6,36	1,5	27,99	54,2	11,3	83,8
76,3	7,99	1,99	24,91	60,0	9,8	84,1

Таблица 4. Параметры пенного продукта и показатели флотации медной руды в установке пенной флотации с замкнутым циклом при варьировании концентрации вспенивателя

Table 4. Froth product parameters and flotation performance indicators for copper ore in a closed-loop froth flotation unit at varying frother concentrations

Концентрация вспенивателя, мг/л	Выход пенного продукта, г	Масса твердого в ПП, г	Доля твердого в ПП, %	Массовая доля меди в ПП, %	Извлечение меди, %
10	2,49	0,91	36,55	15,6	72,8
15	2,99	0,94	31,44	15,4	74,2
20	3,11	0,96	30,87	15,3	75,3
30	3,37	1,05	29,41	14,7	77,5
40	3,58	1,13	28,39	13,9	79,4
50	3,89	1,26	28,06	13,4	81,4
60	4,29	1,34	27,40	11,4	81,8

Причинами снижения качества концентрата является уменьшение интенсивности удаления из пены избыточной водной фазы, содержащей значительное количество шламовых классов нерудных минералов. Результаты расчетов показано, что качество флотационного концентрата существенно уменьшается при концентрации вспенивателя более 50 мг/л.

Выбор оптимального режима по расходу концентрации вспенивателя также определяется технико-экономическим анализом, сравнивающим потери от качества концентрата со стоимостью дополнительно извлекаемой меди при переходе к режиму скоростной флотации. При наличии «запаса» по качеству концентрата вполне целесообразно использовать режим скоростной флотации, обеспечивающий повышение извлечения меди от 5,6 до 9,0%.

Реализация режима высокоскоростной флотации требует поддержания режима, обеспечивающего стекание механически захваченной воды из аэрофлокул в сформированном пенном продукте. Рациональным конструктивным решением поставленной задачи является применение флотационных машин с модернизированной формой зоны транспортирования–вторичной концентрации, обеспечивающей требуемый режим стекания избыточной водной фазы из пенного слоя. Требуемый результат достигается путем увеличения диаметра этой зоны относительно зоны аэрации–флотации, обеспечивающем снижение скорости подъема пены при равной продолжительности пребывания в зоне транспортирования–вторичной

концентрации. Так в модернизированной флотомашине КФМ-1400 ВМГ с целью сохранения оптимальных условий вторичной концентрации флотируемых минералов в пенном продукте при реализации высокоскоростного режима флотации было достигнуто пропорциональное увеличение диаметра верхней части корпуса (рис. 5).

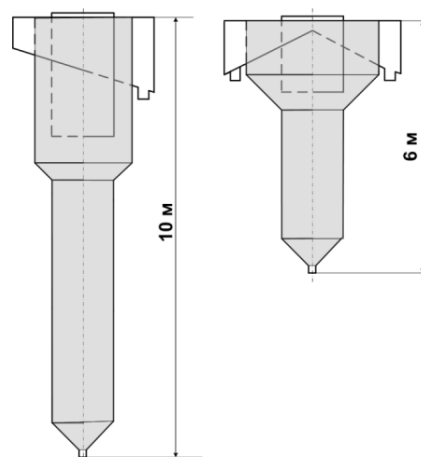


Рис. 5. Изменение пропорций рабочей камеры флотомашины КФМ при модернизации: а – КФМ-1400; б – КФМ-1400ВМГ

Fig. 5. Changes in the proportions of the working chamber of the KFM flotation machine during modernization: a is KFM-1400; b is KFM-1400VMG

Результаты промышленных испытаний, проведенных на медных рудах ГОКов АО «Святогор» показали, что за счет описанных изменений конструкции при переходе на высокоскоростной режим пенной флотации удалось обеспечить сохранение требуемых кондиций получаемого концентрата (табл. 5).

Таблица 5. Сравнение конструктивных параметров, производительности и показателей флотации до и после модернизации флотационной машины КФМ-1400

Table 5. Comparison of the design parameters, capacity, and flotation performance indicators before and after modernization of the KFM-1400 flotation machine

Показатели	Флотомашины	
	КФМ-1400	КФМ-1400ВМГ
Объем камеры флотомашины, м ³	19,0	15,1
Высота флотомашины, м	10,0	6,0
Площадь пенообразования, м ²	3,8	7,1
Максимальный расход сжатого воздуха, м ³ /ч	180	250
Удельная производительность по пенному продукту, т/ч·м ³	0,371	0,985
Извлечение меди в концентрат, %	88,7	88,9
Массовая доля меди в концентрате, %	15,3	15,1

Отмеченное изменение основных технологических показателей (извлечение меди в концентрат и качество концентрата) незначительно показывает возможность достижения основного показателя скоростной флотации – удельной производительности по пенному продукту. Практическим результатом модернизации флотомашины КФМ (модель КФМ-1400ВМГ) путем увеличения диаметра верхней части корпуса стало в конечном итоге увеличение ее производительности с 0,371 до 0,985 т/ч м³ при сохранении требуемого качества медного концентрата.

Выводы

С применением минеральных люминофоров-имитаторов флотируемых и нефлотируемых минералов определены закономерности и установлен эффект механического выноса нерудных минералов в пенный продукт пневматической флотации при увеличении расхода воздуха и концентрации вспенивателя. Обоснована необходимость корректировки режимов пневматической флотации в части выбора расхода воздуха и концентрации вспенивателя, не вызывающих резкого увеличения извлечения в пенный продукт нерудных минералов.

Результатами анализа параметров пенного слоя и показателей флотации медной руды подтвержден эффект увеличения выхода пенного продукта, повышение извлечения меди и снижение содержания меди в пенном продукте вследствие сокращения времени пребывания аэрофлокул в зоне транспортирования – вторичной концентрации при увеличении расхода воздуха и концентрации вспенивателя.

Показано, что реализация режима скоростной флотации требует поддержания режима, обеспечивающего уменьшение выхода в пенный продукт механически захваченной аэрофлокулами водной фазы, содержащей нерудные минералы. Решение поставленной задачи достигается увеличением времени пребывания пены в зоне транспортирования – вторичной концентрации флотационных машин. В модернизированной флотомашине КФМ-1400ВМГ данная цель достигнута уменьшением высоты рабочей зоны и пропорциональным увеличением диаметра верхней части корпуса. За счет модернизации конструкции удалось реализовать высокоскоростной режим пенной флотации при сохранении высокого извлечения меди и требуемого качества получаемого концентрата.

Список источников

1. Froth recovery of industrial flotation cells / Yianatos J.B., Moysb M.H., Contrerasa F., Villanuevac A. // Minerals Engineering. 2008, no. 21, pp. 817–825.
2. Jameson G.J. New directions in flotation machine design // Minerals Engineering. 2010, no. 23, pp. 835–841.
3. Информационно-аналитические материалы: Мировые достижения развития методов, техники и технологий переработки минерального сырья. Серия: Обогащение минерального сырья. М.: Изд-во ВИМС, 2020. 52 с.
4. Обзор рынка флотационных установок для переработки минерального сырья в России. Исследовательская группа «Инфомай». 2023. 165 с.
5. Особенности работы флотомашины серии КФМ в промышленных схемах обогащения медных, медно-цинковых и свинцово-цинковых руд / Видуецкий М.Г., Мальцев В.А., Паньшин А.М., Йочев И.Щ. // Цветные металлы. 2017. № 6. С. 12-21.
6. Колонные пневматические флотационные машины. Эволюция / Видуецкий М.Г., Гарифулин И.Ф., Мальцев В.А., Пургин А.П. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2020. 149 с.
7. Калугин А. И., Лебедок А. В., Маркворт Л. Эффективная технология пневматической флотации. Возможности технической модернизации флотационного процесса для горнохимического сырья // Рациональное освоение недр. 2021. № 1. С. 56-59.
8. Опыт разработки и эксплуатации колонных флотационных машин НПО «СОМЭК» для обогащения апатит-нефелиновых руд Хибинских месторождений / Никитин А.Ю., Елисеева Р.А., Юшина Т.И., Калугин А.И.// Горный журнал. 2021. №12. С.37-43. DOI: 10.17580/gzh.2021.12.07.
9. Farrokhpay S., Filippov L., Fornasiero D. Flotation of fine particles: A review. // Miner Process Extract Metallurg Rev. 2021, no. 42, pp. 473–83. DOI: 10.1080/08827508.2020.1793140.
10. Flotation Performance and Gas Dispersion Properties in a Laboratory Flotation Cell / Femenias F., Maldonado M., Miranda N., Gutierrez L. // Minerals. 2022, no. 12. 1351. <https://doi.org/10.3390/min12111351>.
11. A methodology for gangue management in the flotation of a PGM-bearing ore through laboratory tests, mineralogical analysis and circuit modeling / McFadzean B., Becker M.,

- Geldenhuis S., Sweet J. // Minerals Engineering. 2024, no. 208, pp. 1–10. doi.org/10.3390/min12111351.
12. 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 ЗабГУ. 2024. Т. 30. № 4. С. 55-70.
13. Моделирование и оптимизация гидроаэродинамического режима в зоне транспортирования – вторичной концентрации в колонных флотационных машинах / Метелев А.А., Видуцкий М.Г., Гарифулин И.Ф., Пургин А.П., Морозов В.В. // Руды и металлы. 2025. №4. С. 88–100.
14. Wang D., Liu Q. Aggregating fine hydrophilic materials in froth flotation to improve separation efficiency through a homo-aggregation flotation process // Advances in Colloid and Interface Science. 2024, no. 325, pp. 1-12, 103110. DOI: 10.1016/j.cis.2024.103110
15. Вилкова Н.Г. Свойства пен и методы их исследования. Пенза, ПГУАС, 2013. 120 с.
16. Zhang W. The Effects of Frothers and Particles on the Characteristics of Pulp and Froth Properties in Flotation—A Critical Review // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. 2016, no. 4, pp. 251-269.
17. Wang D., Liu Q. Influence of aggregation/dispersion state of hydrophilic particles on their entrainment in fine mineral particle flotation // Minerals Eng. 2021, no. 166, 106835. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.106835.
18. Martinez J., Maldonado M., Gutierrez L. A Method to Predict Water Recovery Rate in the Collection and Froth Zone of Flotation Systems // Minerals. 2020, no. 10, 630; doi:10.3390/min10070630.
19. Modification of Diamond Spectrum Pattern Using Lumiphore-Containing Agents with Zinc and Cadmium Chalcogenides / Chanturia V.A., Morozov V.V., Dvoichenkova G.P., Chanturia E.L., Podkamenny Y.A. // Journal of Mining Science. 2022, vol. 58, no. 4, pp. 599–609. DOI: 10.1134/S1062739122040093.
- lead-zinc ores. *Tsvetnye metally* [Non-Ferrous Metals]. 2017;(6):12-21. (In Russ.)
6. Viduyetskiy M.G., Garifulin I.F., Maltsev V.A., Purgin A.P. *Kolonnnye pnevmaticheskie flotatsionnye mashiny. Evolyutsiya* [Column pneumatic flotation machines. Evolution]. Yekaterinburg: UrFU Publishing House, 2020, 149 p. (In Russ.)
7. Kalugin A.I., Lebedok A.V., Markvort L. Effective pneumatic flotation technology. Possibilities for technical modernization of the flotation process for mining and chemical raw materials. *Ratsionalnoe osvoenie nedr* [Rational Development of Mineral Resources]. 2021;(1):56-59. (In Russ.)
8. Nikitin A.Yu., Eliseeva R.A., Yushina T.I., Kalugin A.I. Experience in the development and operation of column flotation machines of the SOMEX Research and Production Association for processing apatite-nepheline ores of the Khibiny deposits. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2021;(12):37-43. DOI: 10.17580/gzh.2021.12.07. (In Russ.)
9. Farrokhpay S., Filippov L., Fornasiero D. Flotation of fine particles: A review. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2021;(42):473-483. DOI: 10.1080/08827508.2020.1793140.
10. Femenias F., Maldonado M., Miranda N., Gutierrez L. Flotation performance and gas dispersion properties in a laboratory flotation cell. Minerals. 2022;(12):1351. DOI: 10.3390/min12111351.
11. McFadzean B., Becker M., Geldenhuis S., Sweet J. A methodology for gangue management in the flotation of a PGM-bearing ore through laboratory tests, mineralogical analysis and circuit modeling. Minerals Engineering. 2024;(208):1-10. doi.org/10.3390/min12111351.
12. Arabadzhi Ya.N., Orekhova N.N., Abdrakhmanov K.I., Abdrakhmanov E.I. Aspect analysis of mechanisms of contamination of sulfide concentrates with slimes from host rocks and review of methods for its reduction. *Vestnik ZabGU* [Transbaikal State University Bulletin]. 2024;30(4):55-70. (In Russ.)
13. Metelev A.A., Viduyetskiy M.G., Garifulin I.F., Purgin A.P., Morozov V.V. Modeling and optimization of the hydrodynamic regime in the transport-secondary concentration zone of column flotation machines. *Rudy i metally* [Ores and Metals]. 2025;(4):88-100. (In Russ.)
14. Wang D., Liu Q. Aggregating fine hydrophilic materials in froth flotation to improve separation efficiency through a homo-aggregation flotation process. Advances in Colloid and Interface Science. 2024;(325):1-12, 103110. DOI: 10.1016/j.cis.2024.103110.
15. Vilkova N.G. *Svoystva pen i metody ikh issledovaniya* [Properties of froth and methods of investigation]. Penza: PSUACE, 2013, 120 p. (In Russ.)
16. Zhang W. The effects of frothers and particles on the characteristics of pulp and froth properties in flotation - A critical review. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. 2016;(4):251-269.
17. Wang D., Liu Q. Influence of aggregation/dispersion state of hydrophilic particles on their entrainment in fine mineral particle flotation. Minerals Engineering. 2021;(166):106835. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.106835.
18. Martinez J., Maldonado M., Gutierrez L. A method to predict water recovery rate in the collection and froth zone

References

1. Yianatos J.B., Moysb M.H., Contreras F., Villanuevac A. Froth recovery of industrial flotation cells. Minerals Engineering. 2008;(21):817-825.
2. Jameson G.J. New directions in flotation machine design. Minerals Engineering. 2010; (23):835-841.
3. *Informatsionno-analiticheskie materialy: Mirovye dostizheniya razvitiya metodov, tekhniki i tekhnologiy pererabotki mineralnogo syrya. Seriya: Obogashchenie mineralnogo syrya* [Information and analytical materials: World achievements in the development of methods, equipment and technologies for mineral processing. Series: Mineral Processing]. Moscow: VIMS Publishing House, 2020, 52 p. (In Russ.)
4. *Obzor rynka flotatsionnykh ustanovok dlya pererabotki mineralnogo syrya v Rossii* [Review of the market of flotation equipment for mineral processing in Russia]. Research Group InfoMine, 2023, 165 p. (In Russ.)
5. Viduyetskiy M.G., Maltsev V.A., Panshin A.M., Yochev I.Sh. Features of operation of KFM flotation machines in industrial processing flowsheets of copper, copper-zinc and

- of flotation systems. Minerals. 2020;(10):630. DOI: 10.3390/min10070630.
19. Chanturia V.A., Morozov V.V., Dvoichenkova G.P., Chanturia E.L., Podkamenny Y.A. Modification of diamond spectrum pattern using luminophore-containing agents with zinc and cadmium chalcogenides. Journal of Mining Science. 2022;58(4):599-609. DOI: 10.1134/S1062739122040093.

Поступила 29.01.2026; принята к публикации 16.03.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 29/01/2026; revised 16/03/2026; published 30/09/2026

Метелёв Алексей Анатольевич – главный инженер,
Научно-исследовательский и проектный институт обогащения и механической обработки полезных ископаемых АО «Уралмеханобр», Екатеринбург, Россия.
Email: Metelev_AA@umbr.ru. Scopus ID: 57195473641.

Закиричный Виталий Николаевич – заместитель генерального директора по науке,
Научно-исследовательский и проектный институт обогащения и механической обработки полезных ископаемых АО «Уралмеханобр», Екатеринбург, Россия.
Scopus ID: 57216488615.

Гарифулин Игорь Фагимьянович – ведущий научный сотрудник,
Научно-исследовательский и проектный институт обогащения и механической обработки полезных ископаемых АО «Уралмеханобр», Екатеринбург, Россия.
Scopus ID: 55826770400.

Пургин Александр Петрович – заведующий отделом,
Научно-исследовательский и проектный институт обогащения и механической обработки полезных ископаемых АО «Уралмеханобр», Екатеринбург, Россия.
Scopus ID: 6603243105.

Морозов Валерий Валентинович – профессор кафедры общей неорганической химии,
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» Минобрнауки РФ, Москва, Россия.
E-mail: dchmggu@mail.ru. ORCID: 0000-0003-4105-944X.

Alexey A. Metelev – Chief Engineer,
Scientific Research and Design Institute for the Enrichment and Mechanical Processing of Minerals (JSC Uralmekhanobr), Yekaterinburg, Russia.
Email: Metelev_AA@umbr.ru. Scopus ID: 57195473641.

Vitaly N. Zakirnichny – Deputy Director General for Science,
Scientific Research and Design Institute for the Enrichment and Mechanical Processing of Minerals (JSC Uralmekhanobr), Yekaterinburg, Russia.
Scopus ID: 57216488615.

Igor F. Garifulin – Leading Researcher,
Scientific Research and Design Institute for the Enrichment and Mechanical Processing of Minerals (JSC Uralmekhanobr), Yekaterinburg, Russia.
Scopus ID: 55826770400

Alexander P. Purgin – Head of the Department,
Scientific Research and Design Institute for the Enrichment and Mechanical Processing of Minerals (JSC Uralmekhanobr), Yekaterinburg, Russia.
Scopus ID: 6603243105.

Valery V. Morozov – Professor of the Department of General Inorganic Chemistry,
The National University of Science and Technology MISIS, Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Moscow, Russia.
Email: dchmggu@mail.ru. ORCID: 0000-0003-4105-944X.

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
 УДК 622.23.05
 DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-25-34



ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЗАВИСИМОСТИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ШАХТНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ ОТ ДИПОЛЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ НА ПРОФИЛЕ ЛОПАТОК РАБОЧЕГО КОЛЕСА

Макаров Н.В.¹, Нурхожаев Е.С.², Макаров В.Н.¹, Попов С.А.¹

¹Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

²АО «Костанайские минералы», Житикара, Республика Казахстан

Аннотация. Постановка задачи (Актуальность работы). Требование снижения себестоимости валового внутреннего продукта РФ и повышения энергоэффективности предприятий горно-металлургического и нефтегазового комплекса актуализирует задачу совершенствования методологии разработки математических моделей аэродинамики радиальных решёток профилей и создания центробежных шахтных вентиляторов повышенной энергоэффективности и нагруженности на базе принципа природоподобной соразмерности. **Цель работы.** Повышение аэродинамического давления, развиваемого вентиляторами, их энергоэффективности и адаптивности за счёт управления проницаемостью лопаток рабочих колёс. **Методология.** Теоретические основы исследования влияния диполя проницаемости на нагруженность и эффективность шахтных центробежных вентиляторов базируются на принципе гидродинамической аналогии диполя и циркуляции потока, поскольку момент диполя определяется расходом и положением источника, стока, расположенных симметрично относительно начала координат при предельном переходе их положения к началу координат. **Новизна.** Отличие от классической циркуляции, где увеличение скорости потока обусловлено увеличением длины пути его движения от передней критической точки до задней критической точки в предлагаемой математической модели изменения скорости обусловлено изменением количества воздуха, что в условиях закона сохранения массы является гидродинамическим аналогом скорости. **Результаты исследований.** В целях верификации разработанной математической модели спроектирована радиальная аэродинамическая схема Ц128-19П с источником и стоком, образующими диполь с выходом на тыльную и рабочую поверхности лопаток соответственно. Созданный на базе разработанной аэродинамической схемы газоотсасывающий вентилятор типа ВЦПГ-8 позволил на 30% повысить развиваемое давление и на 8% КПД в сравнении с серийно выпускаемыми вентиляторами типа УВЦГ. **Практическая значимость.** Математическая модель зависимости нагруженности вентиляторов от диполя проницаемости, расположенного на профиле лопаток рабочего колеса может быть использована для создания газоотсасывающих вентиляторов в условиях комбинированного проветривания газообильных угольных шахт, а также вентиляторов местного проветривания для обеспечения аэродинамической безопасности в длинных тупиковых выработках.

Ключевые слова: конформное отображение, задняя критическая точка, комплексный потенциал, вихреобразование, Риманова плоскость, теория Н.Е. Жуковского, циркуляционное обтекание, сопряжённая комплексная скорость, адаптивность, проницаемость

© Макаров Н.В., Нурхожаев Е.С., Макаров В.Н., Попов С.А., 2026

Для цитирования

Теоретические основы зависимости аэродинамической нагруженности и энергоэффективности шахтных центробежных вентиляторов от диполя проницаемости на профиле лопаток рабочего колеса / Макаров Н.В., Нурхожаев Е.С., Макаров В.Н., Попов С.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 25-34. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-25-34>



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

THEORETICAL FOUNDATIONS OF THE DEPENDENCE OF AERODYNAMIC LOADING AND ENERGY EFFICIENCY OF MINE CENTRIFUGAL FANS ON THE PERMEABILITY DIPOLE ON IMPELLER BLADE PROFILES

Makarov N.V.¹, Nurkhodzhaev E.S.², Makarov V.N.¹, Popov S.A.¹

¹Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

²Kostanay Minerals JSC, Jitiqara, Kazakhstan

Abstract. Problem Statement (Relevance). The need to reduce the production cost of Russia's gross domestic product and improve the energy efficiency of enterprises in the mining and metallurgical and oil and gas industries makes it particularly important to improve the methodology for developing mathematical models of the aerodynamics of radial airfoil cascades and to develop highly energy-efficient and highly loaded centrifugal mine fans based on the principle of nature-like proportionality. **Objectives.** The research is aimed at increasing the aerodynamic pressure generated by fans, their energy efficiency, and adaptability by controlling the permeability of impeller blades. **Methods Applied.** The theoretical foundations for studying the effect of a permeability dipole on the aerodynamic loading and efficiency of mine centrifugal fans are based on the hydrodynamic analogy between a dipole and flow circulation, since the dipole moment is determined by the flow rate and the position of a source and sink located symmetrically with respect to the origin as their positions approach the origin in the limiting transition. **Originality.** In contrast to classical circulation, in which an increase in flow velocity is associated with an increase in the length of the flow path from the front stagnation point to the rear stagnation point, the proposed mathematical model attributes the change in velocity to a change in the amount of air, which, under the law of conservation of mass, constitutes a hydrodynamic analogue of velocity. **Result.** To verify the developed mathematical model, a radial aerodynamic configuration CD128-19P has been designed, with a source and sink forming a dipole and emerging onto the rear and working surfaces of the blade, respectively. The gas-exhausting fan VCPG-8 developed on the basis of the proposed aerodynamic configuration increased the generated pressure by 30% and efficiency by 8% compared with serially manufactured UVCG-type fans. **Practical Relevance.** The mathematical model describing the dependence of fan aerodynamic loading on a permeability dipole located on the impeller blade profile can be used to develop gas-exhausting fans for combined ventilation systems in gassy coal mines, as well as auxiliary ventilation fans to ensure aerodynamic safety in long blind-end mine workings.

Keywords: conformal mapping, rear stagnation point, complex potential, vortex formation, Riemann surface, N. E. Zhukovsky theory, circulatory flow, conjugate complex velocity, adaptability, permeability

For citation

Makarov N.V., Nurkhodzhaev E.S., Makarov V.N., Popov S.A. Theoretical Foundations of the Dependence of Aerodynamic Loading and Energy Efficiency of Mine Centrifugal Fans on the Permeability Dipole on Impeller Blade Profiles. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 25-34. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-25-34>

Введение

Рост производительности труда на предприятиях горно-металлургического комплекса, глубины и протяжённости подземных выработок актуализирует задачу совершенствования методологии разработки математических моделей аэродинамики радиальных решёток профилей и создания центробежных шахтных вентиляторов повышенной энергоэффективности и нагруженности на базе принципа природоподобной соизмерности [1-3].

В соответствии с теорией Н.Е. Жуковского, подъёмная сила крылового профиля эквивалентна действию набегающего потока на присоединённый вихрь, интенсивность которого равна циркуляции потока по замкнутому контуру, окружающему обтекаемый профиль. Математическая модель Н.Е. Жу-

ковского построена на условии непроницаемости крылового профиля, который математически заменён на присоединённый вихрь, интенсивность которого зависит от формы профиля и угла набегающего потока. Это условие накладывает определённые ограничения на аэродинамическую нагруженность и адаптивность круговых решёток профилей и, как следствие, экономичность турбомашин. Исследования и анализ обтекания природных объектов показывает, что эффективность их взаимодействия, безотрывное обтекание в широком диапазоне изменения внешних условий в значительной степени обеспечиваются не только за счёт изменения их формы, в частности изменения формы крыла птицы, но и за счёт управления его проницаемостью, то есть способностью пористой среды пропускать через себя газ или жидкость,

обеспечивая частичное перетекание потока для регулирования циркуляции скорости [4-6].

Для построения теоретической модели, описывающей аэродинамику обтекания круговой решётки профилей с проницаемым контуром по аналогии с обтеканием природных объектов, в статье предложен вид комплексного потенциала потока, обтекающего замкнутый контур с возможностью перетекания части потока с рабочей поверхности профиля на нерабочую за счёт его перераспределения. Изменение скорости потока, приводящее в соответствии с уравнением Бернулли к изменению статического давления и, как результат, аэродинамической нагруженности, то есть давления, развиваемого круговой решёткой профилей, происходит за счёт перераспределения расхода воздуха между рабочей и тыльной поверхностями, что в условиях неразрывности потока приводит к изменению скорости. Отличие от классической циркуляции, где увеличение скорости потока обусловлено увеличением длины пути его движения от передней критической точки (ПКТ) профиля до его задней критической точки (ЗКТ), в предлагаемой математической модели изменение скорости обусловлено изменением количества воздуха, что в условиях закона сохранения массы является гидродинамическим аналогом скорости. По аналогии с природными объектами такой потенциал скорости может быть назван комплексным потенциалом природоподобных потоков [7, 8].

Актуальность. Требование снижения себестоимости валового внутреннего продукта РФ и повышения энергоэффективности предприятий горно-металлургического и нефтегазового комплекса актуализирует задачу разработки новых теоретических подходов к проектированию турбомашин, расходы на эксплуатацию которых составляют существенную долю в структуре затрат производственной себестоимости [9-11].

Объект и предмет исследований. Вентиляторные установки для аппаратов воздушного охлаждения компрессорной станции магистральных газопроводов, а также энергоёмкие вентиляторы, главным образом используемые для проветривания шахт рудников, туннелей, и аэродинамические процессы, взаимодействия лопаток рабочих колёс турбомашин с проницаемой поверхностью.

Цель исследований – повышение аэродинамического давления, развиваемого вентиляторами, их энергоэффективности и адаптивности за счёт управления проницаемостью лопаток рабочих колёс.

В настоящее время широкое распространение нашли методы инженерного компьютерного анализа для исследования и расчёта оптимальных параметров профилей лопаток рабочих колёс турбомашин. Однако они отличаются большими затратами машинного времени для построения базовой топологической схемы и её оптимизации. Одним из способов снижения затрат машинного времени топологической оптимизации, определения базовой области исходных параметров актуальным становится использование методов аэродинамического расчёта на базе гипотезы Жуковского–

Чаплыгина с использованием метода конформных отображений. Однако вышеуказанная гипотеза неприменима для профилей с активным управлением циркуляцией, основанным на управлении проницаемостью обтекаемых профилей. Таким образом, становится актуальна задача модификации теории и гипотезы Жуковского–Чаплыгина применительно к профилям, использующим в качестве активного управления их обтеканием гидродинамические особенности, то есть источники, стоки на их поверхности за счёт управления проницаемостью обтекаемых тел [12-15].

Методология исследований

Теоретические основы исследования влияния диполя проницаемости на нагруженность и эффективность шахтных центробежных вентиляторов базируются на принципе гидродинамической аналогии диполя и циркуляции потока, поскольку момент диполя определяется расходом и положением источника, стока, расположенных симметрично относительно начала координат при придельном переходе их положения к началу координат [4, 14].

Результаты исследований

Как известно, действительная часть интеграла по замкнутому контуру от комплексной скорости, то есть от производной комплексного потенциала по комплексной координате, равна циркуляции скорости γ по вышеуказанному контуру, а мнимая часть этого интеграла равна секунднему объёмному расходу набегающего потока Q через вышеуказанный контур.

Таким образом, классическая теория обтекания непроницаемых тел предполагает, что в области течения функция тока $\beta = \cos t$, поскольку интеграл $\oint d\beta = 0$.

Исследования обтекания природных объектов, в частности «крыла птицы», показывают, что эффективность их взаимодействия с набегающим потоком в значительной степени определяется двумя факторами, обеспечивающими плавное безотрывное обтекание с целью устранения отрывного вихреобразования, то есть потери энергии при изменении результирующей подъёмной силы [4, 15]:

- возможностью изменения формы профиля;
- способностью управлять проницаемостью крыла для обеспечения целенаправленного перетекания части набегающего потока.

Дополнительную результирующую подъёмную силу, то есть дополнительную циркуляцию потока в физическом процессе перетекания части набегающего потока за счёт проницаемости контура, математически можно смоделировать с использованием теории функции комплексного переменного на круге радиусом r вспомогательной Римановой плоскости за счёт уточнения мнимой составляющей комплексного потенциала течения путём наложения дополнительно диполя, включающего источник и сток с выходом их на поверхность круга и расположенных по мнимой оси координат, представленной на **рис. 1**. Дополнительное аэродинамическое давление будет создавать-

ся за счёт части набегающего потока, образующего диполь проницаемости по мнимой оси координат. Указанное приведёт к изменению скорости потока, обтекающего контур проницаемости симметрично действительной оси координат и, как результат, к возникновению перепада давления согласно уравнению Бернулли с вектором силы, параллельным мнимой оси координат, то есть перпендикулярным действительной оси [16, 17].

Учитывая вышеуказанные свойства функций комплексных переменных для построения комплексного потенциала природоподобного потока, воспользуемся принципом суперпозиции. Используя известный комплексный потенциал без рециркуляционного обтекания круга радиусом r , наложив на него комплексный потенциал диполя с моментом m , расположенным вдоль мнимой оси координат $0i$, получим

$$P_n(\chi) = |V_\infty| \left(\chi + \frac{r^2}{\chi} \right) + \frac{mi}{4\pi\chi}, \quad (1)$$

где $m = 2\pi r^2 \cdot k \cdot |V_\infty|$ – момент диполя; $2\pi r \cdot k$ – доля объёмного секундного расхода потока через замкнутый проницаемый контур от набегающего потока.

С учётом вышесказанного определим сопряжённую скорость обтекания круга радиусом r с проницаемым контуром в виде

$$\bar{V} = \frac{dP}{d\chi} = |V_\infty| \left(1 - \frac{r^2}{\chi^2} \right) + \frac{qi}{4\pi\chi}, \quad (2)$$

где $q = 2\pi r \cdot k \cdot |V_\infty|$ – объёмный секундный расход источника и стока диполя через замкнутый проницаемый контур.

Критические точки комплексного потенциала, то есть точки, в которых сопряжённая комплексная скорость равна 0, с учётом (2) найдём, решая уравнение

$$|V_\infty| \left(1 - \frac{r^2}{\chi^2} \right) + \frac{krV_\infty}{\chi} = 0. \quad (3)$$

Представим уравнение в виде квадратного уравнения:

$$\chi^2 + k_r \chi - r^2 = 0. \quad (4)$$

Учитывая, что $0 \leq k \leq 2$, решая уравнение (4), получим

$$\chi_{1,2} = \pm r \sqrt{1 - \frac{k^2}{4}} + \frac{kr}{2} i. \quad (5)$$

Таким образом, в зависимости от доли набегающего потока, используемой для формирования диполя в виде источника и стока через замкнутый проницаемый контур, изменяется положение критических точек на круге радиусом r . При этом модуль каждого из корней равен r , то есть критические точки, в которых сопряжённая комплексная скорость равна 0, расположены на окружности контуром r . При $k = 0$, то есть отсутствии диполя, критические точки находятся на пересечении окружности контура с действительной осью 0φ , что соответствует бесциркуляционному обтеканию. При $k = 2$, то есть при условии, когда весь набегающий поток, обтекающий замкнутый контур одновременно проходит через сток и источник диполя, критические точки, в которых сопряжённая комплексная скорость равна 0, совпадают друг с другом и находятся на мнимой оси $0i$ в точке $r \cdot i$.

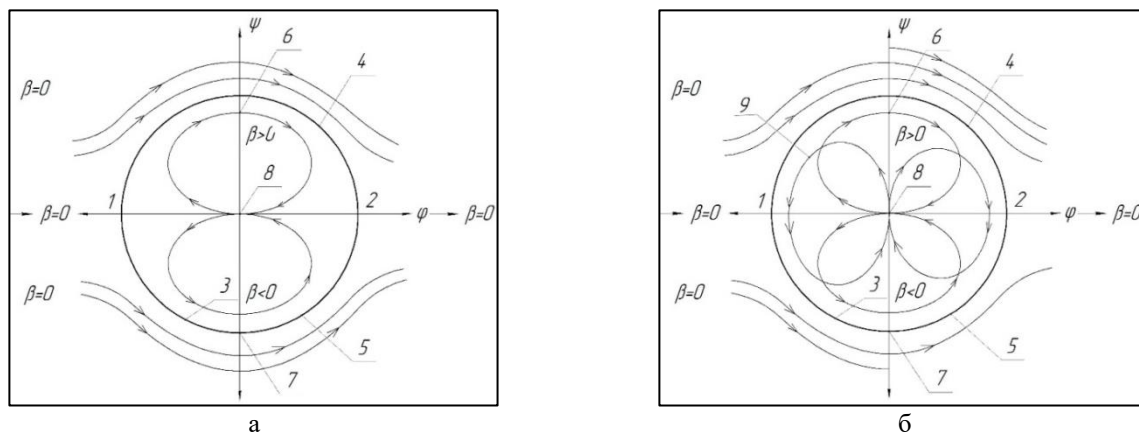


Рис. 1. Графическое изображение обтекания: а – непроницаемого круга; б – проницаемого круга с использованием однородного потока и одного-двух диполей соответственно с осями, направленными вдоль 0φ и $0i$; 1 – передняя критическая точка; 2 – задняя критическая точка; 3 – средняя линия крылового профиля; 4 – тыльная поверхность крылового профиля; 5 – рабочая поверхность крылового профиля; 6 – сток; 7 – источник; 8 – диполь

Fig. 1. Graphic representation of flow around: a is a permeable circle; b is an impermeable circle using a uniform flow and one or two dipoles, respectively, with the axes directed along 0φ and $0i$; 1 is front stagnation point; 2 is rear stagnation point; 3 is airfoil midline; 4 is rear surface of the airfoil; 5 is working surface of the airfoil; 6 is sink; 7 is source; 8 is dipole

Из сказанного видно, что при прохождении части набегающего потока через источник и сток диполя, расположенного по мнимой оси координат, возникает циркуляционное обтекание круга радиусом r с сохранением симметрии потока относительно мнимой оси $O\psi$, однако с нарушением данной симметрии по отношению к действительной оси $O\varphi$. По этой причине главный вектор сил давления потока на поверхность замкнутого контура отличается от 0 будучи направленным вдоль мнимой оси $O\psi$. Обусловлено это тем, что в месте расположения стока часть набегающего потока поступает внутрь замкнутого контура, в силу его проницаемости, чем обусловлено уменьшение скорости обтекания круга радиусом r в этой области вследствие снижения секундного расхода набегающего потока. Именно уменьшение секундного расхода набегающего потока в области стока диполя, приводящее к уменьшению скорости, способствует в соответствии с уравнением Бернулли увеличению давления в этой области. Прямо противоположный процесс происходит при обтекании замкнутого проницаемого контура в области источника диполя, где суммарно увеличивается секундный расход набегающего потока, что приводит к снижению давления. Указанное приводит к тому, что главный вектор сил набегающего потока, обтекающего замкнутый проницаемый контур, будет направлен по мнимой оси $O\psi$ (см. рис. 1).

С помощью интеграла по замкнутому проникаемому контуру определим результирующую силу давления R_{ψ} :

$$R\psi = r \int_0^{2\pi} P \sin \theta d\theta, \quad (6)$$

где θ – полярный угол между радиусом круга и осью $O\varphi$; P – давление на замкнутом проницаемом контуре круга в соответствии с уравнением Бернулли (рис. 2).

С учётом (2) и выражения комплексного числа в виде показательной функции преобразуем сопряжённую комплексную скорость на замкнутом проницаемом контуре круга радиусом r в виде

$$\begin{aligned} V &= |V_\infty| ie^{-i\theta} \cdot \frac{e^{i\theta} - e^{-i\theta}}{2i} - \frac{krV_\infty}{r} ie^{-i\theta} = \\ &= ie^{-i\theta} (2|V_\infty| \sin \theta - kV_\infty). \end{aligned} \quad (7)$$

После преобразований с учётом (7) получим выражение для модуля скорости и коэффициента давления на замкнутом проницаемом контуре круга радиусом r :

$$\begin{cases} |V| = |V_\infty| \cdot |2\sin\theta - k|, \\ C_p = 1 - (2\sin\theta - k)^2. \end{cases} \quad (8)$$

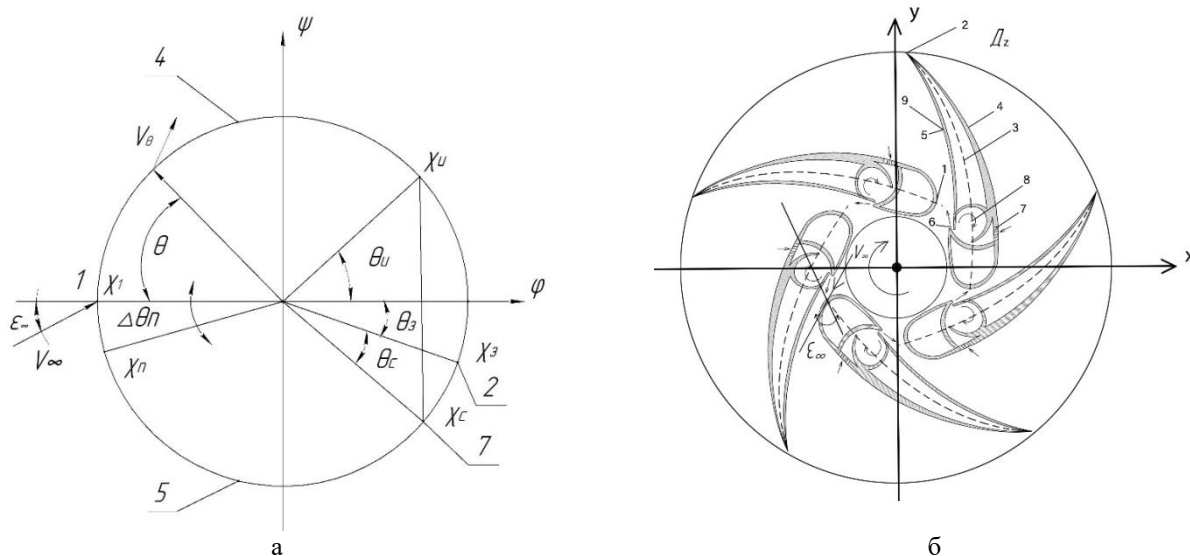


Рис. 2. Графическая модель конформного преобразования комплексного потенциала циркуляционного обтекания круга радиусом r с проницаемым контуром, содержащим диполь с источником и стоком многолистной Римановой поверхности D_χ на круговую решётку крыловых профилей с источником и стоком на тыльной и рабочей поверхностях соответственно в физической плоскости течения D_Z

Fig. 2. Graphic model of the conformal transformation of the complex potential of circulatory flow around a circle of radius r with a permeable contour containing a dipole with a source and sink on a multi-sheet Riemann surface D_χ onto a circular airfoil cascade with a source and sink located on the rear and working surfaces, respectively, in the physical flow plane D_Z

В отличие от обтекания непроницаемого контура в рассматриваемом случае коэффициент давления C_p зависит от параметра k , то есть доли набегающего потока, формирующей диполь. Таким образом, с учётом (8) для подобия обтекания проницаемых замкнутых контуров необходимо обеспечивать одинаковость в сравниваемых течениях параметра k [18, 19].

С учётом уравнения (6), выражения давления P в соответствии с уравнением Бернулли, принимая во внимание (8), получим уравнение для расчёта результирующей подъёмной силы, параллельной мнимой оси $O\psi$, в виде

$$R\psi \frac{\rho r}{2} \int_0^{2\pi} (2|V_\infty| \sin \theta - k|V_\infty|)^2 \sin \theta d = \quad (9)$$

$$= -\rho 2\pi r \cdot k|V_\infty| = \rho q|V_\infty|.$$

Таким образом, по аналогии с циркуляционным обтеканием круга радиусом r , согласно общей теории Н.Е. Жуковского, для проницаемого контура при бесциркуляционном обтекании, то есть без наложения на круг радиусом r вихря с циркуляцией γ результирующая подъёмная сила, параллельная мнимой оси $O\psi$, обусловленная перетеканием части набегающего со скоростью V_∞ потока при стоке и источнике, расположенных симметрично действительной оси $O\varphi$, равна произведению плотности потока на его расход через сток, источник и на скорость набегающего потока [20].

Возникновение результирующей подъёмной силы в данном случае аналогично принципу работы турбопаруса Кусто.

С учётом [4] и (2) комплексный потенциал потока циркуляционного обтекания круга радиусом r с проницаемым контуром и углом ϵ_∞ между вектором набегающего потока V_∞ и действительной осью $O\varphi$ получим в виде

$$P(\chi)_2 \bar{V}_\infty \chi + V_\infty \frac{r^2}{\chi} + (krV_\infty i \ln \chi + \frac{\gamma}{2\pi i} \ln \chi) + \quad (10)$$

$$+ i(krV_\infty + \frac{\gamma}{2\pi}) \ln \chi.$$

Таким образом, $\gamma_n = (k \cdot r \cdot |V_\infty| + \gamma)$ – приведённая циркуляция потока, обтекающего замкнутый проницаемый круг радиусом r .

С учётом общей теории Н.Е. Жуковского, постулата Жуковского-Чаплыгина-Кутта теории функций комплексного переменного, преобразующей функции, осуществляющей конформное отображение обтекаемого замкнутого контура в плоскости комплексного переменного круга радиусом r , в плоскости комплексного переменного $\chi = \varphi + i\psi$ на круговую решётку профилей с диполями в Римановой плоскости комплексного переменного $Z = x + iy$, получим урав-

нение циркуляции Γ в круговой решётке профилей физической плоскости течения в виде

$$\Gamma_n = -4\pi r |V_\infty| \left(\sin \theta + \frac{k}{4\pi} \right) f'_\infty, \quad (11)$$

где f'_∞ – производная от преобразующей функции конформного отображения контура крылового профиля Н.Е. Жуковского на круг радиусом r .

Перетекание набегающего потока с помощью диполя создаёт дополнительную циркуляцию за счёт условного смещения передней критической точки крылового профиля. Необходимо учитывать, что при фактическом физическом смещении передней критической точки происходит увеличение угла набегающего потока, то есть длины пути его движения, и, в силу постулата Н.Е. Жуковского, с учётом неразрывности потока увеличивается скорость, что снижает давление, создавая результирующую подъёмную силу. При перетекании потока, в силу пористости контура, скорость его увеличивается за счёт сложения с секундным расходом от источника или уменьшается за счёт вычитания секундного расхода стока диполя. В этом случае передняя критическая точка физически не смещается, то есть не происходит фактического увеличения угла набегающего потока, в результате чего исключается отрывное вихреобразование, обеспечивается плавное обтекание в широком диапазоне изменения результирующей подъёмной силы.

Ось диполя может быть смещена параллельно мнимой оси $O\psi$ на угол θ_d для изменения положения стока и источника на замкнутом проницаемом контуре.

В этом случае комплексный потенциал потока, циркуляционно обтекающего круг радиусом r с пористым контуром, диполя с источником и стоком в координатах $\theta_d, -\theta_d$ соответственно, углом ϵ_∞ между вектором набегающего потока V_∞ и действительной осью $O\varphi$, получим в виде

$$P(\chi)_2 \bar{V}_\infty \chi + V_\infty \frac{r^2}{\chi} + ikr\bar{V}_\infty \cdot \ln(\chi - \chi_d) + i \frac{\gamma}{2\pi} \chi. \quad (12)$$

Циркуляция потока вокруг круга радиусом r с пористым контуром будет определена по формуле

$$\gamma_{nd} = -4\pi r |V_\infty| \left[\left(\sin \theta + \frac{k}{4\pi} + \frac{\sin(\theta_\infty - \theta_d)}{2} \right) \right]. \quad (13)$$

Учитывая, что, согласно постулату Жуковского-Чаплыгина-Кутта, скорость в ЗКТ равна 0, то есть должно быть обеспечено плавное её обтекание потоком, угол условного смещения ПКТ θ_n можно определить по формуле

$$\Delta\theta_n = ar \sin \left(\frac{k}{\pi \sin^2 \theta d} - \sin^2 0,5\theta d \right). \quad (14)$$

Увеличение доли перетекающего потока увеличивает условное смещение ПКТ, то есть результирующую силу давления. Смещение диполя от оси 0ψ уменьшает условное смещение ПКТ.

Для проверки достоверности предложенной математической модели был создан действующий макет центробежного вентилятора с диаметром рабочего колеса 0,6 м по известной, распространённой аэродинамической схеме Ц82-17. На базе данного действующего макета созданы рабочие колёса с диполями в области хвостовой части лопаток с геометрическими параметрами, обеспечивающими возможность изменения доли перетекаемой части воздушного потока через диполь. При этом геометрические параметры элементов хвостовой части лопасти рабочего колеса и скорость его вращения определялись из условия автомодельности потока по критерию Рейльдса ($Re \geq 10^5$), что исключает влияние вязкости и турбулентности в модельных и натурных испытаниях.

На **рис. 3** приведены аэродинамические характеристики зависимости коэффициента давления, то есть аэродинамической нагруженности ψ от коэффициента подачи ϕ радиальных схем типа ЦД с диполем хвостовой части профилей лопаток и базовой аэродинамической схемы Ц82-17, полученные в соответствии с предложенной математической моделью и проверенные в результате аэродинамических испытаний на стенде в соответствии с ГОСТ 11004-19. Из анализа приведённых на **рис. 3** характеристик видно,

что увеличение доли перетекаемой части воздушного потока через диполь в диапазоне 0,1–0,15 обеспечивает максимальный прирост аэродинамической нагруженности, то есть развиваемого вентилятором давления. Дальнейшее увеличение свыше 0,2 и уменьшения от 0,05 не приводит к существенному изменению аэродинамической нагруженности. Проведённый статистический анализ показал, что с доверительной вероятностью 0,95 доверительный интервал дисперсии аэродинамической нагруженности, рассчитанный теоретически и полученный экспериментально, не превышает $\pm 11\%$ в диапазоне коэффициента подачи вентилятора 0,12–0,24. Критическое значение критерия Стьюдента $t_{кр}$ равняется 2,04 при 30-ти замерах, то есть степенях свободы, в то время как фактическое его значение $t_{ф}$ равняется 1,98, что подтверждает статистическую незначимость различий теоретических и экспериментальных результатов.

В целях верификации разработанной математической модели спроектирована радиальная аэродинамическая схема Ц128-19П с источником и стоком, образующими диполь с выходом на тыльную и рабочую поверхности лопаток соответственно. Созданный на базе разработанной аэродинамической схемы газоотсасывающий вентилятор типа ВЦПГ-8 и его аэродинамическая схема приведены на **рис. 4**.

Применение диполя проницаемости в хвостовой части профиля лопаток рабочего колеса газоотсасывающего вентилятора ВЦПГ позволило на 30% повысить развиваемое им давление и на 8% КПД в сравнении с серийно выпускаемыми вентиляторами типа УВЦГ.

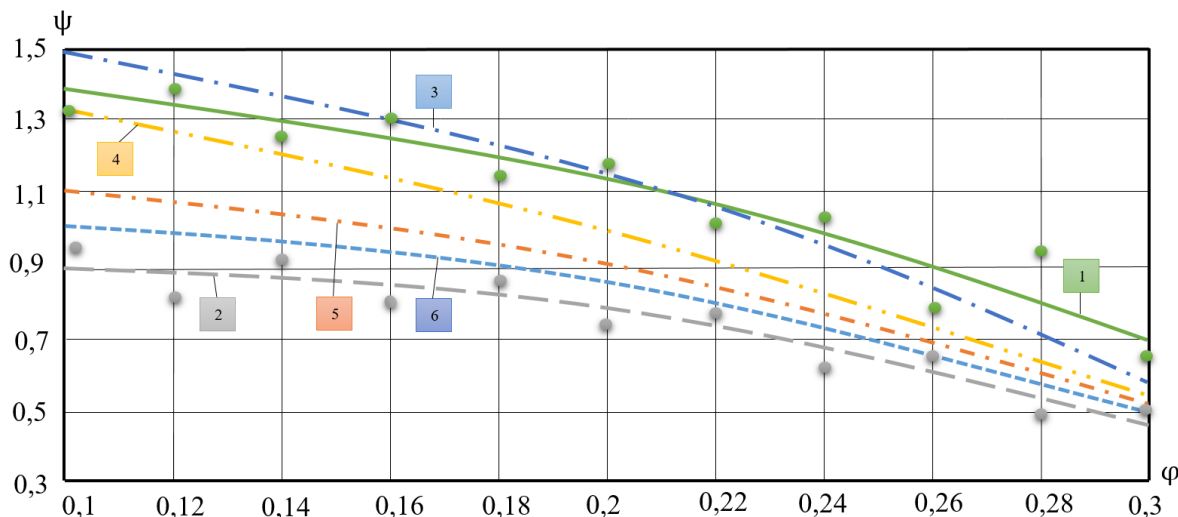


Рис. 3. Аэродинамические характеристики радиальных схем типа ЦД с диполем хвостовой части профилей: экспериментальные: 1 – ЦД128-19; 2 – ЦД82-17; расчётные: 3 – ЦД128 – 19, $k = 0,2$; 4 – ЦД110 – 18, $k = 0,15$; 5 – ЦД100 – 17, $k = 0,1$; 6 – ЦД90 – 17, $k = 0,05$

Fig. 3. Aerodynamic characteristics of radial CD-type configurations with a dipole in the tail section of the profile: experimental data: 1 is CD128-19; 2 is CD82-17; calculated data: 3 is CD128-19, $k = 0.2$; 4 is CD110-18, $k = 0.15$; 5 is CD100-17, $k = 0.1$; 6 is CD90-17, $k = 0.05$

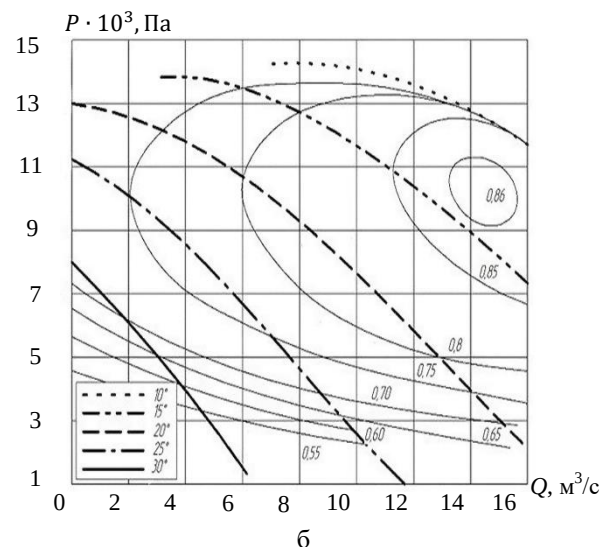
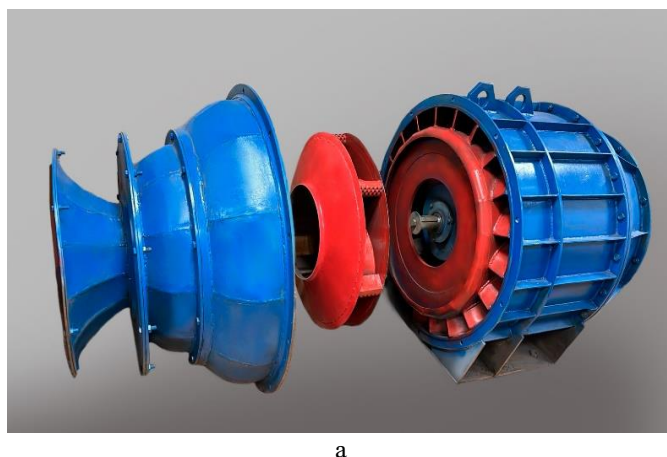


Рис. 4. Газоотсасывающий вентилятор ВЦПГ-8 (а) и аэродинамическая характеристика газоотсасывающего вентилятора ВЦПГ-8 (б)

Fig. 4. Gas-exhausting fan VCPG-8 (a) and aerodynamic characteristic of the VCPG-8 gas-exhausting fan (б)

Обсуждение результата

Таким образом, в соответствии с предложенной математической моделью обтекания крыловых профилей с проницаемым контуром в виде диполя с источником и стоком на тыльной и рабочей поверхностях соответственно можно производить расчёт аэродинамических параметров радиальных турбомашин в зависимости от их геометрических параметров, осуществлять оптимизацию по критериям максимального роста развиваемого давления и адаптивности, что повышает их экономичность.

В целях верификации разработанной математической модели спроектирована радиальная аэродинамическая схема Ц128-19П с источником и стоком, образующими диполь с выходом на тыльную и рабочую поверхности лопаток профилей соответственно. Созданный на базе разработанной аэродинамической схемы газоотсасывающий вентилятор типа ВЦПГ-8, приведённый на рис. 3, позволил на 30% повысить развиваемое давление и на 8% КПД в сравнении с серийно выпускаемыми вентиляторами УВЦГ.

Выводы

1. Доказана зависимость аэродинамической нагруженности и энергоэффективности шахтных центробежных вентиляторов от диполя проницаемости, располагаемого на профиле лопаток рабочего колеса.
2. Предложен вид комплексного потенциала потока, обтекающего замкнутый контур с возможностью перетекания части потока из области повышенного давления в область пониженного давления, в целях управления циркуляцией скорости и, как результат, аэродинамической нагруженностью шахтных центробежных вентиляторов.

3. Дополнительная результирующая подъёмная сила, то есть дополнительная циркуляция скорости потока в физическом процессе перетекания части набегающего потока за счёт проницаемости, математически получена с использованием теории функции комплексного переменного за счёт уточнения мнимой составляющей комплексного потенциала течения путём наложения дополнительно диполя, включающего источник и сток с выходом их на контур обтекаемого круга и расположенного по мнимой оси координат.

4. По аналогии с циркуляционным обтеканием круга, согласно общей теории Н.Е. Жуковского, для проницаемого контура результирующая подъёмная сила, обусловленная перетеканием части набегающего потока, равна произведению плотности потока на его расход через сток, источник и на скорость набегающего потока.

5. Созданный на базе разработанной аэродинамической схемы газоотсасывающий вентилятор типа ВЦПГ-8 позволил на 30% повысить развиваемое давление и на 8% КПД в сравнении с серийно выпускаемыми вентиляторами типа УВЦГ.

Список источников

1. Квашнин Л., Аверкин А. К вопросу совершенствования современных вентиляторов // Норвежский журнал развития международной науки. 2020. №47. С. 43–46.
2. Ковальчук М. В., Нарайкин О. С., Яцишина Е. Б. Природоподобные технологии: новые возможности и новые вызовы // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89. № 5. С. 455–465. DOI: 10/31857/S0869-5873895455-465
3. Критерии подобия природной соразмерности турбомашин / Макаров В.Н., Боярских Г.А., Валиев Н.Г., Макаров Н.В., Дылдин Г.П. // Известия вузов. Горный журнал. 2020. №8. С. 81–89.

4. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
5. Математическая модель активного управления циркуляционным течением в шахтных вентиляторах / Макаров В.Н., Макаров Н.В., Чураков Е.О., Молчанов М.В. // ГИАБ. 2021. №11-1. С. 239-247. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_239
6. Scalise K. A., Teixeira M. B., Kocsis K. Managing heat in underground mines: the importance of incorporating the thermal flywheel effect into climatic modeling // Mining, Metallurgy & Exploration. 2020, vol. 38, pp. 575-579. DOI: 10.1007/s42461-020-00323-5.
7. Simulating the sensitivity of underground ventilation networks to fluctuating ambient conditions / Fair R., Laar J. H., Nell K., Nell D., Mathews E. H. // South African Journal of Industrial Engineering November. 2021, vol. 32, no. 3, pp. 42-51. DOI: 10.7166/32-3-2616
8. Estimation of multistage hydraulic fracturing parameters using 4D simulation / Bosikov I.I., Klyuev R.V., Silaev I.V., Pilieva D.E. // Mining Science and Technology (Russia). 2023, vol. 8, no. 2, pp.141-149. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-01-97
9. Малашкина В.А. Направления повышения эффективности дегазации для улучшения условий труда шахтёров угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 7. С. 69-75.
10. Разработка методов и средств управления аэрогазодинамическими процессами на добычных участках / Босиков И.И., Клюев Р.В., Хетагуров В.Н., Ажмухамедов И.М. // Устойчивое развитие горных территорий. 2021. Т. 13, № 1. С. 77-83. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-77-83
11. Малашкина В.А. Исследование возможностей повышения эффективности подземной дегазации угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 9. С. 131-137. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-131-137
12. Полянский И.С., Логинов К.О. Приближённый метод решения задачи конформного отображения произвольного многоугольника на единичный круг // Вестник Удмуртского Университета. 2022. Т. 32. Вып. 1. С. 107-129. DOI: 10.35634/vm220108
13. Kychkin A., Nikolaev A. IoT-based mine ventilation control system architecture with digital twin // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing: materials of the ICIEAM. 2020, Sochi, 18-22 May 2020. New York, 2020. Art. 9111995. 5 p.
14. Перспективы развития струйной техники и технологии в нефтегазовой отрасли / Шлеин Г.А., Клещенко И.И., Балуев А.А. и др. // Нефть и газ. 2020. № 3. С. 75-88.
15. Ganzulenko O.Y., Petkova A.P. Energy efficiency of the linear rack drive for sucker rod pumping units // Journal of Mining Institute. 2023, vol. 261, pp. 325-338. EDN HIGAOE
16. Обоснование аэродинамического природоподобия в теории проектирования адаптивных шахтных вентиляторов / Макаров Н.В., Смагулов А.Р., Макаров В.Н., Баландин В.Н. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2023. Т. 10, №5. С. 116-123.
17. Shivani Kaustubh Chitale, Pranjal Nitin Jadhav, Snehal Suresh Dhoble, Dr. Mr. Satyajeet Deshmukh. (2021) Parameters Affecting Efficiency of Centrifugal Pump - A Review, IJSRST, 8:49-58. DOI:10.32628/IJSRST218573
18. Математическая модель управления локальной диффузностью адаптивных шахтных турбомашин / Макаров В.Н., Макаров Н.В., Угольников А.В., Чураков Е.О., Молчанов М.В. // ГИАБ. 2021. №11-1. С. 248-257. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_239
19. Федяков А.О. Повышение эффективности работы центробежных насосов // Вестник науки. 2024. №12(81). С. 1278–1285. ISSN: 2712-8849
20. Nasser M.M.S., Vuorinen M. Conformal invariants in simply connected domains // Computational Methods and Function Theory. 2020, vol. 20, issue 3, pp. 747-775.

References

1. Kvashnin L., Averkin A. On the improvement of modern fans. *Norvezhskii zhurnal razvitiya mezhdunarodnoi nauki* [Norwegian journal of development of the international science]. 2020;(47):43-46. (In Russ.)
2. Kovalchuk M.V., Naraikin O.S., Yatsishina E.B. Nature-like technologies: new opportunities and new challenges. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk* [Vestnik of the Russian Academy of Sciences]. 2019;89(5):455-465. DOI: 10.31857/S0869-5873895455-465. (In Russ.)
3. Makarov V.N., Boyarskikh G.A., Valiev N.G., Makarov N.V., Dyldin G.P. Similarity criteria of natural proportionality of turbomachines. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [University Proceedings. Mining Journal]. 2020;(8):81-89. (In Russ.)
4. Loitsyanskii L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of Liquid and Gas]. Moscow: Drofa, 2003, 840 p. (In Russ.)
5. Makarov V.N., Makarov N.V., Churakov E.O., Molchanov M.V. Mathematical model of active control of circulation flow in mine fans. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2021;(11-1):239-247. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_239. (In Russ.)
6. Scalise K.A., Teixeira M.B., Kocsis K. Managing heat in underground mines: the importance of incorporating the thermal flywheel effect into climatic modeling. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2020;38:575-579. DOI: 10.1007/s42461-020-00323-5.
7. Fair R., Laar J.H., Nell K., Nell D., Mathews E.H. Simulating the sensitivity of underground ventilation networks to fluctuating ambient conditions. *South African Journal of Industrial Engineering*. 2021;32(3):42-51. DOI: 10.7166/32-3-2616.
8. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Silaev I.V., Pilieva D.E. Estimation of multistage hydraulic fracturing parameters using 4D simulation. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(2):141-149. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-01-97.
9. Malashkina V.A. Directions for improving degassing efficiency to improve working conditions of coal miners. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2018;(7):69-75. (In Russ.)
10. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Khetagurov V.N., Azhmukhamedov I.M. Development of methods and means for controlling aerogasdynamic processes at production sites. *Ustoichivoe razvitie gornyykh territorii* [Sustainable development of mountain territories]. 2021;13(1):77-83. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-77-83.

- opment of mountain territories]. 2021;13(1):77-83. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-77-83. (In Russ.)
11. Malashkina V.A. Study of the possibilities of improving the efficiency of underground degassing of coal mines. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2019;(9):131-137. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-131-137. (In Russ.)
12. Polyanskii I.S., Loginov K.O. An approximate method for solving the problem of conformal mapping of an arbitrary polygon onto a unit circle. *Vestnik Udmurtskogo universiteta* [Bulletin of Udmurt University]. 2022;32(1):107-129. DOI: 10.35634/vm220108. (In Russ.)
13. Kychkin A., Nikolaev A. IoT-based mine ventilation control system architecture with digital twin. In: 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM): Proceedings of the ICIEAM. Sochi, May 18-22, 2020. New York; 2020. Art. 9111995. 5 p.
14. Shlein G.A., Kleshchenko I.I., Baluev A.A., et al. [Prospects for the development of jet equipment and technology in the oil and gas industry. *Neft i gaz* [Oil and Gas]. 2020;(3):75-88. (In Russ.)
15. Ganzulenko O.Y., Petkova A.P. Energy efficiency of the linear rack drive for sucker rod pumping units. *Journal of Mining Institute*. 2023;261:325-338. EDN HIGAOE.
16. Makarov N.V., Smagulov A.R., Makarov V.N., Balandin V.N. Substantiation of aerodynamic natural similarity in the theory of designing adaptive mine fans. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and technical problems of mineral development]. 2023;10(5): 116-123. (In Russ.)
17. Chitale S.K., Jadhav P.N., Dhoble S.S., Deshmukh S. Parameters Affecting Efficiency of Centrifugal Pump - A Review. *IJSRST*. 2021;8:49-58. DOI: 10.32628/IJSRST218573.
18. Makarov V.N., Makarov N.V., Ugolnikov A.V., Churakov E.V., Molchanov M.V. Mathematical model for controlling the local diffusivity of adaptive mine turbomachines. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2021;(11-1):248-257. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_239. (In Russ.)
19. Fedyakov A.O. Improving the efficiency of centrifugal pumps. *Vestnik nauki* [Bulletin of Science]. 2024;(12(81)):1278-1285. ISSN 2712-8849. (In Russ.)
20. Nasser M.M.S., Vuorinen M. Conformal invariants in simply connected domains. *Computational Methods and Function Theory*. 2020;20(3):747-775.

Поступила 13.01.2026; принята к публикации 26.02.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 13/01/2026; revised 26/02/2026; published 30/09/2026

Макаров Николай Владимирович – кандидат технических наук, доцент,
Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.
Email: mnikolay84@mail.ru. ORCID 0000-0001-7039-6272

Нурхожаев Ербол Сапарбаевич – председатель правления,
АО «Костанайские минералы», Житикара, Республика Казахстан.
Email: Rus.akhmetov@mail.ru

Макаров Владимир Николаевич – доктор технических наук, доцент,
Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.
Email: ur.intelnedra@gmail.com. ORCID 0000-0002-3785-5569

Попов Семен Анатольевич – аспирант,
Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.
Email: popov.semyun@bk.ru. ORCID 0009-0004-3771-571X

Nikolay V. Makarov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia.
Email: mnikolay84@mail.ru. ORCID 0000-0001-7039-6272

Yerbol S. Nurkhozaev – Chairman of the Board,
Kostanay Minerals JSC, Jitigara, Kazakhstan.
Email: Rus.akhmetov@mail.ru

Vladimir N. Makarov – DrSc (Eng.), Associate Professor,
Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia.
E-mail: ur.intelnedra@gmail.com. ORCID 0000-0002-3785-5569

Semyon A. Popov – Postgraduate Student,
Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia.
Email: popov.semyun@bk.ru. ORCID 0009-0004-3771-571X

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ METAL FORMING

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

УДК 669.715

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-35-42



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ АСИММЕТРИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ МАРКИ 20Х13 ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ

Бирюков М.А., Песин А.М., Бирюкова О.Д., Пустовойтов Д.О., Могильных А.Е.,
Лактионов А.А.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Производство нержавеющей проката характеризуется значительным набором технологических операций и высокой стоимостью. Нержавеющая сталь 20Х13 обладает умеренной коррозионной стойкостью и твердостью, удовлетворительной термостойкостью до 500 °С. Ее использование в различных отраслях промышленности становится возможным после проведения операций термообработки, направленных на получение необходимых свойств материала. Однако достижение высоких прочностных характеристик в данной марке затруднительно. Эти аспекты играют важную роль при производстве нержавеющей марки сталей в России в связи с высокой долей импорта данной продукции. **Цель работы.** Произвести оценку влияния скоростной асимметрии на прочностные характеристики нержавеющей марки стали 20Х13. **Используемые методы.** Горячая асимметричная прокатка стали марки 20Х13 проводилась на уникальном промышленно-лабораторном стане 400 лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилыева» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Химический состав стали марки 20Х13 соответствовал ГОСТ 5632-2014. Нагрев заготовок перед прокаткой осуществлялся в электропечи ПЛ2. Геометрия образцов оценивались при помощи микрометра по ГОСТ 6507. Подготовку продольных образцов для проведения испытаний на растяжение на испытательной машине Shimadzu Servopulser U-series осуществляли по ГОСТ 1497. **Результат.** С увеличением коэффициента асимметрии в диапазоне от 1,0 до 1,7 относительное обжатие возрастало с 55,3 до 64,4%, усилие снижалось на 25%, прочностные характеристики возрастали не менее чем на 20%. Полученный уровень технологической пластичности позволяет проводить асимметричную прокатку с большим коэффициентом асимметрии. **Практическая значимость.** Использование высокотемпературного отпуска отразилось в тенденции менее выраженного снижения прочностных характеристик образцов после асимметричной прокатки по сравнению с симметричной. Текущие эффекты позволяют сделать вывод о возможности сокращения технологических операций при производстве нержавеющей проката из стали марки 20Х13 с применением асимметричного деформирования.

Ключевые слова: нержавеющие стали, асимметричная прокатка, горячая прокатка, механические свойства, усилие прокатки, технологическая пластичность, очаг деформации

Исследования выполнены за счет гранта РНФ (соглашение № 24-19-20026, <https://rscf.ru/project/24-19-20026/>).

© Бирюков М.А., Песин А.М., Бирюкова О.Д., Пустовойтов Д.О., Могильных А.Е., Лактионов А.А., 2026

Для цитирования

Исследование влияния кинематической асимметрии на механические свойства нержавеющей стали марки 20Х13 при горячей прокатке / Бирюков М.А., Песин А.М., Бирюкова О.Д., Пустовойтов Д.О., Могильных А.Е., Лактионов А.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 35-42. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-35-42>



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

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF KINEMATIC ASYMMETRY ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF 20KH13 STAINLESS STEEL DURING HOT ROLLING

Biryukov M.A., Pesin A.M., Biryukova O.D., Pustovoitov D.O., Mogilnykh A.E., Laktionov A.A.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem statement (Relevance). The production of stainless steel products involves a significant number of technological operations and high production costs. 20Kh13 stainless steel exhibits moderate corrosion resistance and hardness, as well as satisfactory heat resistance up to 500°C. Its use in various industrial sectors requires heat treatment operations aimed at achieving the required material properties. However, obtaining high strength characteristics in this steel grade is challenging. These aspects are particularly important for the production of stainless steel grades in Russia due to the high share of imported products. **Objectives.** The research is aimed at evaluation of the effect of velocity asymmetry on the strength characteristics of 20Kh13 stainless steel. **Methods Applied.** Hot asymmetric rolling of 20Kh13 steel has been performed on a unique industrial-laboratory 400 rolling mill at the Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials, Nosov Magnitogorsk State Technical University. The chemical composition of 20Kh13 steel complies with GOST 5632-2014. The billets have been heated prior to rolling in a PL2 electric furnace. The specimen geometry has been measured using a micrometer in accordance with GOST 6507. Longitudinal specimens for tensile testing on a Shimadzu Servopulser U-series testing machine have been prepared in accordance with GOST 1497. **Results.** As the asymmetry coefficient increased from 1.0 to 1.7, the relative reduction increased from 55.3% to 64.4%, while the force decreased by 25% and the strength characteristics increased by at least 20%. The resulting level of technological ductility makes it possible to perform asymmetric rolling at a higher asymmetry coefficient. **Practical Relevance.** The use of high-temperature tempering has resulted in a less pronounced decrease in the strength characteristics of specimens after asymmetric rolling compared with symmetric rolling. These effects indicate the possibility of reducing the number of technological operations in the production of 20Kh13 stainless steel products by applying asymmetric deformation.

Keywords: stainless steels, asymmetric rolling, hot rolling, mechanical properties, rolling force, technological ductility, deformation zone.

The research was supported by a grant from the Russian Science Foundation (Agreement No. 24-19-20026, <https://rscf.ru/project/24-19-20026/>).

For citation

Biryukov M.A., Pesin A.M., Biryukova O.D., Pustovoitov D.O., Mogilnykh A.E., Laktionov A.A. Investigation of the Effect of Kinematic Asymmetry on the Mechanical Properties of 20Kh13 Stainless Steel During Hot Rolling. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 35-42. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-35-42>

Введение

Получение материалов, обладающих высокими прочностными и одновременно пластическими характеристиками, является актуальной наукоемкой задачей, решение которой позволит расширить экспериментально-теоретические основы процессов обработки материалов давлением, а также решить ряд значимых задач: сокращение затрат на производство, улучшение свойств материала [1-9]. Эти аспекты играют важную роль при производстве нержавеющей марки сталей в России в связи с высокой долей импорта данной продукции. По оценке ассоциации «Спецсталь» около 70 тыс. т горячекатаного нержавеющей плоского металлопроката было поставлено из-за рубежа, в частности из Китая, только за первый квартал 2026 года [10].

Прокат из нержавеющей марки сталей широко применяется в различных отраслях: строительной, ме-

дицинской, пищевой, автомобильной и т.д. В частности, такого вида стали используются при производстве изделий высокой точности. Одной из самых известных марок нержавеющей сталей, получившей широкое распространение в России, является низкоуглеродистая легированная хромом марка 20X13. Ближайшие аналоги, производимые за рубежом, включают в себя AISI 420, 1.4021, X20Cr13, SUS 420J1, 2Cr13, S42000. Основой химического состава 20X13 являются углерод (около 0,20%, ГОСТ 5632-2014 [11]: 0,16–0,25%) и хром (около 13%, ГОСТ 5632-2014: 12,0–14,0%), полный перечень элементов указан в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав стали марки 20X13, мас.доля %

Table 1. Chemical composition of 20Kh13 steel, wt. %

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni
0,16–0,25	до 0,6	до 0,6	до 0,025	до 0,03	12–14	до 0,6

Механические свойства данной стали возможно сформировать благодаря различным способам термической обработки: закалке, отжигу или отпуску (в соответствии с ГОСТ 5582-75 температура нагрева и выдержки должна составлять 740–800°C [12]). Сочетание таких потребительских характеристик, как высокая твердость, износостойкость, жаростойкость в совокупности с умеренной коррозионной стойкостью в слабоагрессивных средах, позволяет использовать марку стали 20X13 при производстве режущего инструмента (ножи, скальпели, лезвия, в том числе инструменты хирургического назначения), при производстве декоративных изделий и в пищевом производстве [13–15]. Однако известно, что высокохромистые стали, в том числе 20X13, склонны к хрупкому разрушению. Зачастую для повышения способности данных сталей к релаксации напряжений при ее деформации используется никель, который приводит к увеличению подвижности дислокаций и уменьшает напряжения, приводящие к хрупкому разрушению. Подвижность дислокаций в значительной мере зависит от массового содержания углерода, при его содержании 0,2% и более значительно затруднена. Поэтому существуют супермартенситные стали (например, SM13CrM/SM13CrS [16, 17]), имеющие в своем составе иную схему легирования: Ni – 3–7%, Mo – 0,8–2,5%, что позволяет снизить массовое содержание углерода до уровня 0,02–0,05% при сохранении механических свойств материала и одновременном улучшении его вязко-пластических, коррозионных характеристик, а также свариваемости.

Тем не менее изменение химического состава, более того легирование такими ценными элементами, как никель или молибден, влечет за собой увеличение стоимости проката в разы, что снижает покупательскую потребность для дорогостоящих нержавеющих марок сталей. В связи с этим в данной работе предлагается рассмотреть альтернативный способ увеличения такой механической характеристики, как прочность, при использовании метода асимметричной прокатки.

Цель исследования включает в себя оценку влияния скоростной асимметрии на прочностные характеристики нержавеющей марки стали 20X13. Асимметричная прокатка является деформационным способом обработки материалов с созданием несимметричных условий, таких как рассогласование скоростей рабочих валков или разность в размерах диаметров рабочих валков и т.п. Подтверждено, что асимметричная прокатка значительно улучшает механические характеристики проката при различных температурах обработки, в том числе при условиях горячей деформации [18–22].

Материалы и методы исследования

Различные технологические схемы асимметричной прокатки были опробованы при получении холоднокатаного нержавеющей проката [23, 24]. Основное направление в этих работах было нацелено на сокращение ряда технологических операций в сложной цепочке производства нержавеющей марок сталей, в том числе исключение таких этапов, как отжиг и травление. При

горячей асимметричной прокатке такого материала оценивается не столько возможность сокращения производственного цикла, сколько способность формирования необходимой микроструктуры, механических и эксплуатационных свойств. Получение высоких значений указанных характеристик позволит, с одной стороны, заменить более дорогостоящие высоколегированные марки по типу AISI 304, AISI 301, AISI 430 и т.д., с другой – сможет обеспечить получение конечной толщины проката до 2,0 мм без обработки на переделе холодной прокатки.

Механизм формирования микроструктуры и механических свойств при горячей асимметричной прокатке включает в себя необходимость обеспечения протекания динамической рекристаллизации. Данный вид рекристаллизации считается одним из самых успешных с точки зрения получения зерен размером менее 3 мкм. Динамика процесса обеспечивается одновременным появлением двух мод деформаций, таких как сдвиг и сжатие, которые, в свою очередь, определяют, насколько эффективно и равномерно будет проходить измельчение зерна в структуре. В этом случае мелкозернистая структура материала благоприятно отразится на увеличении прочностных характеристик.

Исследование влияния кинематической асимметрии на механические характеристики горячекатаного проката из марки стали 20X13 производства АО «Корпорация „Красный Октябрь”» проводилось в научно-исследовательской лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Деформирование материала проводилось на уникальной научной установке – промышленно-лабораторном стане 400 асимметричной прокатки. Уникальность данного оборудования обусловлена возможностью варьирования отношения скоростей рабочих валков V_1/V_2 в пределе от 1 до 10.

Исходные размеры заготовок составили 5×50×125 мм (толщина × ширина × длина). Нагрев заготовок перед горячей прокаткой осуществлялся в электропечи ПЛ20 до температуры 1000°C, время выдержки около 60 мин. Варьирование коэффициента асимметрии производилось вплоть до значения 1,7, для сравнения также осуществляли прокатку в симметричном режиме. Скорость нижнего валка составляла 8 об/мин, верхнего – варьировалась от 4,7 до 8,0 об/мин. По итогам прокатки проводился анализ усилий и моментов. Качество поверхности и геометрия образцов оценивались визуально, при помощи микрометра по ГОСТ 6507 [25]. Поверхность образцов для проведения механических испытаний обрабатывалась от остаточной окалины с помощью холодной очистки поверхности пескоструйной обработкой. Подготовку продольных образцов для проведения испытаний на растяжение на сервогидравлической испытательной машине Shimadzu Servopulser U-series осуществляли по ГОСТ 1497 [26]. Определялись характеристики: предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение. Начальные условия процессов симметричной и асимметричной прокатки стали марки 20X13 представлены в табл. 2.

Таблица 2. Начальные условия для прокатки стали марки 20X13

Table 2. Initial conditions for rolling of 20Kh13 steel

Скорость верхнего вала, об/мин	Скорость нижнего вала, об/мин	Коэф- фици- ент асим- метрии	Темпера- тура нагрева, °С	Время нагрева, мин	Охлажде- ние
8,0	8,0	1,0	1000	60	на воздухе
5,3	8,0	1,5			с печью
					на воздухе
					с печью
4,7	8,0	1,7			на воздухе
					с печью

Для измерения температуры использовалась тепловизионная камера с лазерным дальномером и диапазоном измерения температуры до 2000°C. Коэффициент излучения был установлен на уровне 0,9.

Температура нагрева была выбрана исходя из результатов дилатометрического исследования – определение значений температур критических точек A_{c1} , A_{c3} для данного материала. Время выдержки заготовки при температуре 1000°C было выбрано исходя из условий необходимости обеспечения температуры завершения деформации $\approx 900-950^\circ\text{C}$ в лабораторных условиях, что подобно промышленным режимам производства проката рассматриваемого сортамента на широкополосных станах горячей прокатки. Часть образцов после охлаждения на воздухе направлена на проведение отпуска при температуре 700°C в течение 60 мин.

Полученные результаты и их обсуждение

Во всех случаях прокатки не выявлено возникновения дефектов кромок обрабатываемых образцов, что говорит об имеющемся запасе пластичности и возможности увеличения коэффициента асимметрии в дальнейшем. Внешний вид прокатанных образцов приведен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид прокатанных образцов

Fig. 1. Appearance of the rolled specimens

Наблюдался известный эффект повышения технологической пластичности, присущий различным материалам в процессе асимметричной прокатки. В табл. 3 приведены фактические значения относительных обжатий при варьировании отношения скоростей валков в диапазоне от 1,0 до 1,7. На рис. 2 проиллюстрированы полученные средние усилия при прокатке с различными коэффициентами асимметрии. Из указанных данных следует, что увеличение коэффициента асимметрии с $K_{ac} = 1$ влечет за собой

повышение значений относительных обжатий на 14% и одновременное снижение усилий прокатки на 25% (для случая с наибольшей асимметрий, при $K_{ac} = 1,7$).

Таблица 3. Результаты горячей прокатки образцов из стали марки 20X13

Table 3. Results of hot rolling of 20Kh13 steel specimens

Коэффициент асимметрии K_{ac}	Относительное обжатие, среднее, %	Конечная толщина, мм
1	55,3	2,24
1,5	60,5	1,98
1,7	64,4	1,78

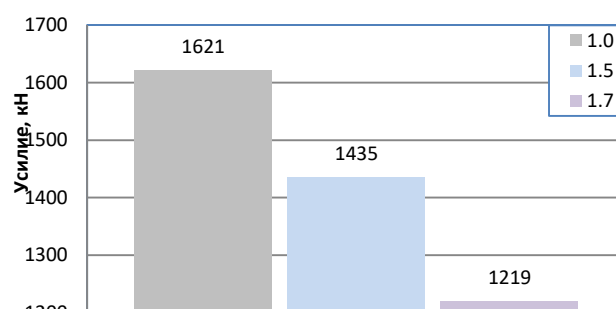


Рис. 2. Изменение усилия при прокатке с различными коэффициентами асимметрии

Fig. 2. Variation in rolling force at different asymmetry coefficients

Температура стали 20X13 в очаге деформации варьировалась в диапазоне 884–921°C. Стоит учитывать потерю температуры материалом во время транспортировки от печи до клетки, время которой составляло не более 5–7 с. При этом снижение температуры составило ориентировочно 7–8% от начальной, соответственно до уровня 920–930°C. Исходя из этого, можно сделать вывод, что в очаге деформации температура снижалась в пределах 1–5%.

Полученные механические свойства при симметричном ($K_{ac} = 1$) и асимметричном ($K_{ac} = 1,5$) режимах горячей прокатки стали марки 20X13 приведены в табл. 4. Необходимо отметить, что получение высоких значений прочностных характеристик зависит не только от наличия фактора асимметрии, но и от уровня деформации во время обработки.

Таблица 4. Средние значения механических свойств стали марки 20X13 после горячей прокатки с большими деформациями

Table 4. Average mechanical properties of 20Kh13 steel after hot rolling with large deformations

Коэффициент асимметрии	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %
1,0	1500	1800	<10
1,5	1800	2100	<10

Так как единичное относительное обжатие при симметричной прокатке составило более 50 %, прочностные характеристики показали значительный рост относительно начального состояния до уровня 1500 МПа по σ_T и 1800 МПа по σ_B . Однако при асимметричной прокатке с ростом относительного обжатия в пределах 8% (при $K_{ac} = 1,5$) предел текучести возрастает на 17%, а временное сопротивление на 14%. Это указывает на одновременное влияние увеличения степени деформации и действия в совокупности простого и чистого сдвига как механизма упрочнения сплавов. Для образцов, обработанных по режимам с коэффициентом асимметрии 1,7, не были получены результаты по значениям механических свойств, так как испытание на растяжение не было завершено в виду конструктивных особенностей испытательной машины – происходило интенсивное абразивное изнашивание насечек плашек, что приводило к проскальзыванию образца в захватах.

Часть образцов после симметричной и асимметричной прокатки подвергалась отпуску при 700°C, полученные результаты по механическим испытаниям на примерах с $K_{ac} = 1$ и $K_{ac} = 1,5$ приведены в табл. 5.

Таблица 5. Средние значения механических свойств стали марки 20X13 после высокотемпературного отпуска

Table 5. Average mechanical properties of 20Kh13 steel after high-temperature tempering

Коэффициент асимметрии	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %
1,0	338	602	17,5
1,5	468	639	19,1

Из результатов следует, что после проведения высокого отпуска образцов значения относительного удлинения возрастают, а значения по пределу текучести и временному сопротивлению снижаются в несколько раз. Данный результат закономерен, но особый интерес представляет изменение характеристики пластичности, которая в случае асимметричного деформирования возрастает одновременно с увеличением прочностных характеристик.

Анализ результатов показывает, что при горячей асимметричной прокатке с использованием коэффициента скоростной асимметрии в пределе до 1,7 возможно получить значительный рост прочностных характеристик обрабатываемого материала. При этом относительное удлинение будет оставаться на уровне <10%. Симметричная прокатка также характеризуется увеличением прочности за счет высокого уровня степеней деформации. В это же время ее показатели ниже по сравнению с асимметричными случаями. Использование в качестве завершающей операции термообработки – высокотемпературного отпуска, характерного для нержавеющей сталей исследуемого класса, приводит к закономерному снижению прочности и увеличению пластичности по сравнению с прокаткой без использования термической обработки.

Заключение

Исследование показало влияние коэффициента асимметрии на изменение технологической пластичности и механических свойств проката из стали марки 20X13. С увеличением коэффициента асимметрии наблюдается устойчивая тенденция к снижению усилия прокатки и повышению прочностных свойств без снижения пластических. Несмотря на высокое массовое содержание хрома в стали, резко повышающего ее прокаливаемость, дефекты кромок при условии охлаждения образцов на воздухе отсутствовали.

С увеличением коэффициента асимметрии в диапазоне от 1,0 до 1,7 относительное обжатие возрастало с 55,3 до 64,4%, при этом прочностные характеристики возрастали не менее чем на 20%. Это говорит о влиянии одновременно больших значений деформации и уровня сдвиговой деформации при асимметричной прокатке.

Полученный уровень технологической пластичности позволяет проводить асимметричную прокатку с большим коэффициентом асимметрии.

Использование высокотемпературного отпуска отразилось в тенденции менее выраженного снижения прочностных характеристик образцов после асимметричной прокатки по сравнению с симметричной.

Результаты экспериментов будут использованы при дальнейшем планировании корректировки текущих режимов асимметричной прокатки в сторону увеличения коэффициентов асимметрии, изменения температуры нагрева перед прокаткой, скорости охлаждения образцов. Текущие эффекты позволяют сделать вывод о возможности сокращения технологических операций при производстве горячекатаного нержавеющей проката из стали марки 20X13 с применением асимметричного деформирования.

Список источников

1. Amininejad A., Jamaati R., Hosseini pour S. J. Improvement of strength-ductility balance of SAE 304 stainless steel by asymmetric cross rolling // Materials Chemistry and Physics. 2020, vol. 256, pp. 123668. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2020.123668.
2. For high productivity of stainless steel strips cold rolling: DLC rollcoating potential analysis / C. Ould, Y. Gachon, X. Badiche, P. Montmitonnet // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2025, vol. 139, pp. 3735–3752. DOI: 10.1007/s00170-025-16105-6.
3. Finite Element Simulation of Hot Rolling for Large-Scale AISI 430 Ferritic Stainless-Steel Slabs Using Industrial Rolling Schedules—Part 1: Set-Up, Optimization, and Validation of Numerical Model / A.O. López, M. Botana-Galvín, I. Collado, L.G. Rovira F.J. Botana // Materials. 2025, vol. 18, no. 2, p. 383. DOI: 10.3390/ma18020383.
4. Compared Corrosion Resistance of 430 Ferritic Stainless Steels Produced via Unidirectional and Reversible Rolling / L. Yang, B. Zhang, Z. Wang, H. Yin, X. Zhao, S. Guo // Coatings. 2026, vol. 16, no.1, p. 57. DOI: 10.3390/coatings16010057.
5. Synergistic engineering of strength, ductility, and corrosion resistance in 316 austenitic stainless steel via cryogenic rolling and tailored annealing / Deng Y., Yang M., Lei L.,

- Zhao F., Wang P., Long S., Xu F. // *Materials Characterization*. 2025, vol. 228. DOI: 10.1016/j.matchar.2025.115395.
6. Effect of Cold-Rolling Reduction on Recrystallization Microstructure, Texture and Corrosion Properties of the X2CrNi12 Ferritic Stainless Steel / R. Li, B. Fu, Y. Wang, J. Li, T. Dong, G. Li, G. Zhang, J. Liu // *Materials*. 2022, vol. 15, no. 19, 6914. DOI: 10.3390/ma15196914.
 7. Microstructural Changes and Strengthening of Austenitic Stainless Steels during Rolling at 473 K / M. Odnobokova, A. Belyakov, N. Enikeev, R. Kaibyshev, R. Valiev // *Materials*. 2020, vol. 10, no. 12, 1614. DOI: 10.3390/met10121614.
 8. Effects of Hot Rolling on the Microstructure, Mechanical, and Damping Properties of High-Nitrogen Stainless Steel / Nikhil T. G., Kumar C., Shukla S., Bhav Singh B., Santharam S., Kumar R.A. // *Steel Research International*. 2024, vol. 96, no. 7, 2400785. DOI: 10.1002/srin.202400785.
 9. Strain-Induced Martensitic Transformation and the Mechanism of Wear and Rolling Contact Fatigue of AISI 301LN Metastable Austenitic Stainless Steel / T.P. Leso, T.W. Mukarati, R. Mostert, C.W. Siyasiya // *Steel Research International*. 2024, vol. 95, no. 9, 2400125 DOI: 10.1002/srin.202400128.
 10. Анализ потребления продукции из нержавеющей стали // Ассоциация «Спецсталь». URL: <https://www.metalinfo.ru/ru/news/185457> (дата обращения: 10.05.2026).
 11. ГОСТ 5632-2014. Нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. Введ. 2015-01-01. М.: Стандартинформ, 2015. 150 с.
 12. ГОСТ 5582-75. Прокат тонколистовой коррозионно-стойкий, жаростойкий и жаропрочный. Технические условия. Введ. 1977-01-01. М.: Стандартинформ, 2010. 23 с.
 13. Свойства высокохромистых коррозионностойких сталей, подвергнутых высокотемпературной термомеханической обработке / М. А. Смирнов, И. Ю. Пышминцев, К. А. Лаев [и др.] // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2015. № 3(51). С. 78-82.
 14. Шамсутдинов Р.М., Дорофеев А.С., Стриженко М.Н. Определение влияния режима термической обработки и химического состава на механические свойства стали 20X13 // *Невская энергетическая перспектива 2025: материалы научно-технической конференции*, Санкт-Петербург, 10–11 сентября 2025 года. Санкт-Петербург: Изд-во СПбПУ, 2025. С. 240-242.
 15. Ивашко В.В. Исследование влияния режимов нагрева на структуру и свойства нержавеющей стали 20X13 // *Вестник Барановичского государственного университета*. Серия: Технические науки. 2015. № 3. С. 45-48.
 16. Jiang W., Zhao K. Effect of Cu on the Formation of Reversed Austenite in Super Martensitic Stainless Steel // *Materials*. 2023, vol. 16, no. 3, 1302. DOI: 10.3390/ma16031302.
 17. Advantageous Implications of Reversed Austenite for the Tensile Properties of Super 13Cr Martensitic Stainless Steel / P. Wang, W. Zheng, X. Yu, Y. Wang // *Materials*. 2022, vol. 15, no. 21, 7697. DOI: 10.3390/ma15217697.
 18. Исследование структуры низкоуглеродистой стали после физического моделирования асимметричного процесса при горячей прокатке / К.С. Горбунов, И.С. Щеренкова, Ю.Н. Орехова, И.П. Мазур // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2023. Т. 21, № 2. С. 54-66. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-54-66.
 19. Повышение производительности горячей прокатки ленты из стали марки Р6М5 с использованием асимметричного деформирования / Д.В. Грачев, А.М. Песин, Г.И. Рааб, Д.О. Пустовойтов // *Кайбышевские чтения : сборник материалов Третьей Международной школы-конференции молодых ученых, Уфа, 16–20 октября 2023 года*. Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2023. С. 38-40.
 20. Пустовойтов Д.О. Исследование формирования мелкозернистой структуры при асимметричной горячей прокатке низкоуглеродистых сталей // *Черные металлы*. 2025. № 1. С. 49-56. DOI: 10.17580/chm.2025.01.09.
 21. Кавалек А., Дья Х., Ожмегов К. Исследование влияния режима листовой прокатки на качество полосы // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2020. Т. 76, № 6. С. 591-601. DOI: 10.32339/0135-5910-2020-6-591-601.
 22. Бирюкова О.Д., Пустовойтов Д.О., Песин А.М. Исследование метода аккумулирующей прокатки как способа обработки алюминиевых композитов 5083/2024 и 5083/1070 // *Теория и технология металлургического производства*. 2019. №1. С. 37-42.
 23. Совершенствование технологии производства нержавеющей стали марки 20X13 на основе использования асимметричной прокатки / А. М. Песин, Д. О. Пустовойтов, К. Ю. Бревнов [и др.] // *Современные проблемы электрометаллургии стали: материалы XIX Всероссийской конференции с международным участием, Челябинск, 10–12 сентября 2024 года*. Челябинск: Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), 2024. С. 265-275.
 24. Исследование влияния асимметричной прокатки на технологическую цепочку изготовления стали марки 20X13 / А. М. Песин, Д. О. Пустовойтов, М. С. Цатурянц [и др.] // *Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций: материалы XVIII международной конференции*, Екатеринбург, 27–31 мая 2024 года. Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2024. С. 100.
 25. ГОСТ 6507-90. Микрометры. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1990. 32 с.
 26. ГОСТ 1497-2023. Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Российский институт стандартизации, 2024. 40 с.

References

1. Amininejad A., Jamaati R., Hosseinipour S.J. Improvement of strength-ductility balance of SAE 304 stainless steel by asymmetric cross rolling. *Materials Chemistry and Physics*. 2020;256:123668. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2020.123668.
2. Ould C., Gachon Y., Badiche X., Montmitonnet P. For high productivity of stainless steel strips cold rolling: DLC roll-coating potential analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025;139: 3735-3752. DOI: 10.1007/s00170-025-16105-6.
3. López A.O., Botana-Galván M., Collado I., Rovira L.G., Botana F.J. Finite Element Simulation of Hot Rolling for Large-Scale AISI 430 Ferritic Stainless-Steel Slabs Using Industrial Rolling Schedules – Part 1: Set-Up, Optimiza-

- tion, and Validation of Numerical Model. *Mater.* 2025;18(2):383. DOI: 10.3390/ma18020383.
4. Yang L., Zhang B., Wang Z., Yin H., Zhao X., Guo S. Compared Corrosion Resistance of 430 Ferritic Stainless Steels Produced via Unidirectional and Reversible Rolling. *Coatings*. 2026;16(1):57. DOI: 10.3390/coatings16010057.
5. Deng Y., Yang M., Lei L., Zhao F., Wang P., Long S., Xu F. Synergistic engineering of strength, ductility, and corrosion resistance in 316 austenitic stainless steel via cryogenic rolling and tailored annealing. *Materials Characterization*. 2025;228:115395. DOI: 10.1016/j.matchar.2025.115395.
6. Li R., Fu B., Wang Y., Li J., Dong T., Li G., Zhang G., Liu J. Effect of cold-rolling reduction on recrystallization microstructure, texture and corrosion properties of the X2CrNi12 ferritic stainless steel. *Materials*. 2022;15(19):6914. DOI: 10.3390/ma15196914.
7. Odnobokova M., Belyakov A., Enikeev N., Kaibyshev R., Valiev R. Microstructural changes and strengthening of austenitic stainless steels during rolling at 473 K. *Metals*. 2020;10(12):1614. DOI: 10.3390/met10121614.
8. Nikhil T.G., Kumar C., Shukla S., Bhav Singh B., Santharam S., Kumar R.A. Effects of hot rolling on the microstructure, mechanical, and damping properties of high-nitrogen stainless steel. *Steel Research International*. 2024;96(7):2400785. DOI: 10.1002/srin.202400785.
9. Leso T.P., Mukarati T.W., Mostert R., Siyasiya C.W. Strain-induced martensitic transformation and the mechanism of wear and rolling contact fatigue of AISI 301LN metastable austenitic stainless steel. *Steel Research International*. 2024;95(9):2400128. DOI: 10.1002/srin.202400128.
10. Analysis of stainless steel product consumption. Special Steel Association. Available at: <https://www.metalinfo.ru/ru/news/185457> (Accessed on May 10, 2026).
11. State Standard GOST 5632-2014. Corrosion-resistant, heat-resistant and heat-strength steels and alloys. Grades. Moscow: Standartinform, 2015, 150 p. (In Russ.)
12. State Standard GOST 5582-75. Corrosion-resistant, heat-resistant and heat-strength thin sheet products. Technical Specifications. Moscow: Standartinform, 2010, 23 p. (In Russ.)
13. Smimov M.A., Pyshmintsev I.Yu., Laev K.A., et al. Properties of high-chromium corrosion-resistant steels subjected to high-temperature thermomechanical treatment. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015;(3(51)):78-82. (In Russ.)
14. Shamsutdinov R.M., Dorofeev A.S., Strizhenok M.N. Determination of the effect of heat treatment conditions and chemical composition on the mechanical properties of 20Kh13 steel. *Nevskaya energeticheskaya perspektiva 2025: Materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Nevsky Energy Perspective 2025: Proceedings of the Scientific and Technical Conference]. Saint Petersburg: Publishing House of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2025, pp. 240-242. (In Russ.)
15. Ivashko V.V. Study of the effect of heating conditions on the structure and properties of 20Kh13 stainless steel. *Vestnik Baranovichskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Baranovich State University. Series: Technical Sciences]. 2015;(3): 45-48. (In Russ.)
16. Jiang W., Zhao K. Effect of Cu on the formation of reversed austenite in super martensitic stainless steel. *Materials*. 2023;16(3):1302. DOI: 10.3390/ma16031302.
17. Wang P., Zheng W., Yu X., Wang Y. Advantageous implications of reversed austenite for the tensile properties of super 13Cr martensitic stainless steel. *Materials*. 2022;15(21):7697. DOI: 10.3390/ma15217697.
18. Gorbunov K.S., Shcherenkova I.S., Orekhova Yu.N., et al. Study of the structure of low-carbon steel after physical modeling of an asymmetric process during hot rolling. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(2):54-66. (In Russ.). DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-54-66.
19. Grachev D.V., Pesin A.M., Raab G.I., Pustovoitov D.O. Increasing the productivity of hot rolling of R6M5 steel strip using asymmetric deformation. *Kaibyshevskie chteniya: Sbornik materialov Tret'ey Mezhdunarodnoy shkoly-konferentsii molodykh uchenykh* [Kaibyshev Readings: Proceedings of the Third International School-Conference of Young Scientists]. Ufa: Ufa University of Science and Technology, 2023, pp. 38-40. (In Russ.)
20. Pustovoitov D.O. Study of fine-grained structure formation during asymmetric hot rolling of low-carbon steels. *Chernye metally* [Ferrous Metals]. 2025;(1):49-56. (In Russ.). DOI: 10.17580/chm.2025.01.09.
21. Kavalek A., Dya Kh., Ozhmegov K. Study of the effect of sheet rolling conditions on strip quality. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous Metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic Information]. 2020;76(6):591-601. (In Russ.). DOI: 10.32339/0135-5910-2020-6-591-601.
22. Biryukova O.D., Pustovoitov D.O., Pesin A.M. Study of cumulative rolling as a method for processing 5083/2024 and 5083/1070 aluminum composites. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Theory and technology of metallurgical production]. 2019;(1):37-42. (In Russ.)
23. Pesin A.M., Pustovoitov D.O., Brevnov K.Yu., et al. Improvement of 20Kh13 stainless steel production technology based on the use of asymmetric rolling. *Sovremennye problemy elektrometallurgii stali: materialy XIX Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Modern problems of steel electrometallurgy. Proceedings of the 19th All-Russian Conference with International Participation. Chelyabinsk: Publishing House of South Ural State University, 2024, pp. 265-275. (In Russ.)
24. Pesin A.M., Pustovoitov D.O., Tsaturyants M.S., et al. Study of the effect of asymmetric rolling on the technological chain for manufacturing 20Kh13 steel. *Mekhanika, resurs i diagnostika materialov i konstruktivnykh materialov XVIII mezhdunarodnoy konferentsii* [Mechanics, resource and diagnostics of materials and structures. Proceedings of the 18th International Conference]. Yekaterinburg: Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2024, p. 100. (In Russ.)
25. State Standard GOST 6507-90. Micrometers. Technical specifications. Moscow: IPK Standards Publishing House, 1990, 32 p. (In Russ.)
26. State Standard GOST 1497-2023. Metals. Methods of tensile testing. Moscow: Russian Institute for Standardization, 2024, 40 p. (In Russ.)

Поступила 15.07.2026; принята к публикации 08.09.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 15/07/2025; revised 08/09/2026; published 30/09/2026

Бирюков Максим Александрович – аспирант, инженер,
НИИ «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева»,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: bigmax174@gmail.com

Песин Александр Моисеевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник,
НИИ «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева»,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
E-mail: pesin@bk.ru. ORCID: 0000-0002-5443-423X

Бирюкова Олеся Дмитриевна – кандидат технических наук, старший преподаватель,
старший научный сотрудник,
НИИ «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева»,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: fimapatsionchik@inbox.ru. ORCID 0000-0002-3922-9289

Пустовойтов Денис Олегович – доктор технических наук, доцент,
начальник отдела компьютерного моделирования,
НИИ «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева»,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: pustovoitov_den@mail.ru. ORCID 0000-0003-0496-0976

Могильных Анна Евгеньевна – кандидат технических наук, начальник организационного отдела,
НИИ «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева»,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: kozhemiakina.a@yandex.ru

Лактионов Андрей Александрович – студент бакалавриата, лаборант-исследователь,
НИИ «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева»,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email andreylaktionov1963@gmail.com

Maxim A. Biryukov – Postgraduate Student, Engineer,
Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: bigmax174@gmail.com

Alexander M. Pesin – DrSc (Eng.), Professor, Chief Researcher,
Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
E-mail: pesin@bk.ru ORCID: 0000-0002-5443-423X

Olesya D. Birykova – PhD (Eng.), Senior Lecturer, Senior Researcher,
Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: fimapatsionchik@inbox.ru ORCID 0000-0002-3922-9289

Denis O. Pustovoitov – DrSc (Eng.), Associate Professor, Head of the Computer Modeling Department,
Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: pustovoitov_den@mail.ru ORCID 0000-0003-0496-0976

Anna E. Mogilnykh – PhD (Eng.), Head of the Organization Department,
Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: kozhemiakina.a@yandex.ru

Andrey A. Laktionov – Bachelor's Student, Laboratory Assistant,
Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email andreylaktionov1963@gmail.com

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.774.38
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-43-53



ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПРЕССОВАНИЯ ЛЕГКОСПЛАВНОЙ БУРИЛЬНОЙ ТРУБЫ НА ОБРАЗОВАНИЕ ТРЕЩИН

Замараева Ю.В.^{1,3}, Логинов Ю.Н.^{3,4}, Дегтярева О.Ф.², Разинкин А.В.¹

¹ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод», Каменск-Уральский, Россия

²ООО «Бурильные трубы», Каменск-Уральский, Россия

³Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

⁴Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Применение легкосплавных бурильных труб актуально в настоящее время. Одной из проблем их производства является образование продольных трещин в технологии горячего прессования. Цель данной работы – установление связи напряженно-деформированного состояния и образования продольных трещин на легкосплавных бурильных трубах с наружными концевыми утолщениями. В качестве объекта исследования выбрана труба из сплава Д16Т. Посредством компьютерного моделирования определены значения тангенциальных растягивающих напряжений и скорости деформации в зоне очага деформации и раздачи на конусном участке прессовой иглы, приводящие к появлению на наружной поверхности труб продольных трещин в зоне концевых утолщений и переходных зонах от утолщения к основному сечению. Выявлено, что наиболее опасной зоной с позиции трещинообразования является наружная поверхность переднего торца трубы. Кроме того, установлено, что утяжинное концевое утолщение имеет уровень тангенциальных растягивающих напряжений ниже, чем выходное концевое утолщение. В рамках работы определено, что одновременное понижение температуры заготовки и инструмента на 20°C и скорости движения инструмента на 0,4 мм/с приводят к значительному понижению уровня растягивающих напряжений в опасных зонах трубы. Изменение температурно-скоростных условий процесса в условиях реального производства привело к уменьшению процента несоответствующей продукции по дефекту «продольные трещины» в 2,6 раза.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, легкосплавные бурильные трубы, продольные трещины, тангенциальные напряжения, скорость деформации, моделирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

© Замараева Ю.В., Логинов Ю.Н., Дегтярева О.Ф., Разинкин А.В., 2026

Для цитирования

Влияние напряженно-деформированного состояния в процессе прессования легкосплавной бурильной трубы на образование трещин / Замараева Ю.В., Логинов Ю.Н., Дегтярева О.Ф., Разинкин А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 43-53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-43-53>



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

INFLUENCE OF THE STRESS-STRAIN STATE DURING THE EXTRUSION OF A LIGHT-ALLOY DRILL PIPE ON CRACK FORMATION

Zamaraeva Yu.V.^{1,3}, Loginov Yu.N.^{3,4}, Degtyareva O.F.², Razinkin A.V.¹¹ JSC Kamensk-Uralsky Metallurgical Works, Kamensk-Uralsky, Russia² LTD Drill Pipes, Kamensk-Uralsky, Russia³ M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia⁴ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The use of light-alloy drill pipes is currently highly relevant. One of the problems in their production is the formation of longitudinal cracks during hot extrusion. The aim of this study is to establish the relationship between the stress-strain state and the formation of longitudinal cracks in light-alloy drill pipes with external end thickenings. Pipes made of D16T alloy have been selected as the object of study. Computer modeling has been used to determine the values of tangential tensile stresses and strain rate in the deformation zone and expansion zone on the conical section of the extrusion mandrel that lead to the formation of longitudinal cracks on the outer surface of the pipes in the zone of the end thickenings and in the transition zones from the thickened section to the main section. It has been found that the most critical zone in terms of crack formation is the outer surface of the front end of the pipe. In addition, it has been established that the swaged end thickening is characterized by a lower level of tangential tensile stresses than the outlet end thickening. The study has demonstrated that simultaneously reducing the billet and tooling temperatures by 20°C and the tooling speed by 0.4 mm/s results in a significant decrease in the level of tensile stresses in the critical zones of the pipe. Changing the temperature and speed conditions of the process under actual production conditions resulted in a 2.6-fold reduction in the percentage of nonconforming products due to the “longitudinal cracks” defect.

Keywords: aluminum alloy, light alloy drill pipes, longitudinal cracks, tangential stresses, strain rate, modeling

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation

Zamaraeva Yu.V., Loginov Yu.N., Degtyareva O.F., Razinkin A.V. Influence of the Stress-Strain State During the Extrusion of a Light-Alloy Drill Pipe on Crack Formation. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 43-53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-43-53>

Введение

Применение алюминиевых сплавов для изготовления легкосплавных бурильных труб (ЛБТ) актуально в настоящее время [1–4]. По сравнению со стальными трубами ЛБТ обладают, например, меньшим удельным весом и модулем упругости, а также более высокими удельной прочностью, демпфирующей способностью и коррозионными свойствами [5, 6].

В нефтегазовой отрасли применяют трубы следующих конфигураций: с внутренними концевыми утолщениями, с внутренними концевыми и протекторным утолщениями, с наружными концевыми утолщениями, с внутренними и наружными концевыми утолщениями.

ЛБТ, имеющие наружные утолщения на концах и плавный переход от них к основному телу трубы, находят широкое применение в бурильной технике [7]. Требуемая конфигурация данных труб создается в процессе прессования за счет конструкции профилированной иглы, меняющей свое положение относительно калибрующего пояска матрицы [8, 9]. Наиболее часто для изготовления труб применяется алюминиевый сплав Д16 при использовании какого-либо варианта термоме-

ханической обработки [10–12]. При этом одной из проблем производства бурильных труб из Д16Т является образование трещин на этапе изготовления.

Многочисленные научные работы посвящены анализу трещинообразования при прессовании [13, 14]. Известно, что в полуфабрикатах могут наблюдаться продольные трещины, причиной которых являются повышенные тангенциальные растягивающие напряжения в области, прилегающей к калибрующему пояску матрицы. Часто трещины возникают, если вместе с действием растягивающих напряжений снижена пластичность материала, например из-за неблагоприятной схемы напряженного состояния, превышения температуры или скорости прессования [15]. В работе [16] установлено, что образование продольных трещин на переднем конце горячепрессованных алюминиевых труб связано с малым уровнем деформации в этой области, что ухудшает структуру и снижает пластичность металла.

Также известны работы по изучению процесса раздачи труб с наружными утолщениями [17–19]. Авторами работ [20, 21] проанализирована раздача трубы из сплава Д16, в результате чего, например, установлено, что увеличение радиуса скругления,

плавного соединяющего конический и цилиндрический участки бурта иглы, приводит к существенному уменьшению приращения внутреннего диаметра трубы, а с уменьшением конусного участка иглы существенно снижается усилие раздачи.

Цель работы – установление связи напряженно-деформированного состояния и образования дефекта типа «продольные трещины» на ЛБТ с наружными концевыми утолщениями.

Экспериментальная часть

В качестве объекта исследования выбраны трубы $d152 \times 170 \times 143$ мм с наружными концевыми утолщениями из сплава Д16Т (рис. 1).

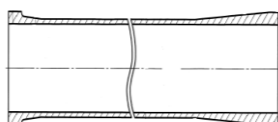


Рис. 1. Труба с наружными концевыми утолщениями
Fig. 1. Pipe with external end thickenings

Для проведения исследования произведена выборка из 100 труб, изготовленных по следующей технологии прессования: температура заготовки – 410°C , контейнера, матрицы и пресс-шайбы – 390°C , иглы – 370°C ; исходная заготовка – полый цилиндр наружным диаметром 362 мм, внутренним диаметром 150 мм, длиной 330 мм; диаметр контейнера 370 мм; скорость движения пуансона во время прессования концевого утолщения – 1,0 мм/с, во время прессования основного сечения – 1,6 мм/с; прессование со смазкой матрицы, втулки контейнера и иглы; коэффициент вытяжки λ при прессовании концевых утолщений равен 13,39, при прессовании основного сечения – 34,13.

По результатам визуального контроля исследуемой выборки труб непосредственно после процесса прессования у 10 шт. (10% от выборки) из них на наружной поверхности в концевых утолщениях и

переходных зонах от утолщения к основному сечению выявлены продольные трещины. Специально отметим, что продольные трещины чаще наблюдались на выходном конце. В основном сечении данный дефект не обнаружен. Внутренняя поверхность труб также не имеет продольных трещин.

На рис. 2 представлен возможный вид дефекта в виде продольных трещин на наружной поверхности трубы в зоне концевого утолщения и переходной зоне от утолщения к основному сечению.

Расчетная часть

Отметим, что на возникновение наружных поверхностных дефектов труб, в том числе и продольных трещин, влияет множество факторов, например химический состав сплава, наличие газовых пузырей, неметаллических включений, интерметаллидных включений и другие дефекты литья [22]. Однако в рамках данной работы принято решение установить связь напряженно-деформированного состояния и образования продольных трещин, выявленных в условиях реального производства, посредством моделирования процесса прессования согласно производственным условиям в программном комплексе DEFORM-2D.

В качестве материала заготовки согласно реальным условиям назначен сплав Д16. Граничные условия трения заданы законом Зибеля (показатель трения на контактной поверхности заготовка – контейнер 0,3, заготовка – игла 0,3, заготовка – матрица 0,3, заготовка – пресс-шайба 0,6). Скоростные условия процесса заданы с опорой на условия реального процесса. Постановка задачи осесимметричная и неизотермическая (температура окружающей среды при выходе из матрицы – 20°C ; коэффициент конвекции в окружающую среду – $0,02 \text{ Н/с/мм}^\circ\text{C}$; коэффициент теплопередачи – $11 \text{ Н/с/мм}^\circ\text{C}$). Температура заготовки и инструмента соответствует условиям реального процесса (описана выше).



а



б



в

Рис. 2. Общий вид концевого утолщения (а), возможный вид дефекта в виде продольной трещины на наружной поверхности трубы в переходной зоне от утолщения к основному сечению (б) и в зоне концевого утолщения (в)

Fig. 2. General view of the end thickening (a); possible defect in the form of a longitudinal crack on the outer surface of the pipe in the transition zone from the thickened section to the main section (б) and in the end-thickening zone (в)

На **рис. 3** представлена исходная сборка инструмента и заготовки (здесь и далее на рисунках показана верхняя половина очага деформации). Присвоим этому варианту моделирования № 1.

На **рис. 4** показаны стадии прессования ЛБТ с наружными концевыми утолщениями.

Здесь специально отметим, что игла для прессования трубы имеет различные диаметры по своей длине. При прессовании выходного концевой утолщения (**рис. 4, а**) на уровне калибрующего пояса матрицы игла имеет свой малый диаметр, при этом ее передняя часть (**зона А**) имеет большой диаметр, и выходящая из очага деформации (ОД) труба при прохождении через этот участок (**зона А**) раздается. При дальнейшем движении пресс-штемpera вместе с иглой вперед в ОД постепенно начинает устанавливаться большой диаметр иглы, при этом происходит прессование переходной зоны от утолщения к основному сечению трубы (**рис. 4, б**). После раздачи металла на конической части иглы формируется переходная зона

трубы с плавно уменьшающейся толщиной стенки. Далее в ОД устанавливается большой диаметр иглы и формируется основное сечение трубы (**рис. 4, в**). Для формирования заднего концевой утолщения игла в ОД вновь устанавливается на уровень своего малого диаметра (**рис. 4, г**). Таким образом, внутренний диаметр трубы постоянен и равен большому диаметру иглы.

Известно, что продольные трещины возникают из-за тангенциальных растягивающих напряжений. Поэтому далее рассмотрено распределение тангенциальных напряжений ($\sigma_{\text{фр}}$) в ОД при прессовании различных зон. Обозначим выходное концевой утолщение – зона 1, переходную зону от выходного концевой утолщения к основному сечению – зона 2, основное сечение – зона 3, утяжинное концевой утолщение – зона 4.

На **рис. 5** для примера показано распределение тангенциальных напряжений в ОД при прессовании зон 1 и 2 соответственно.

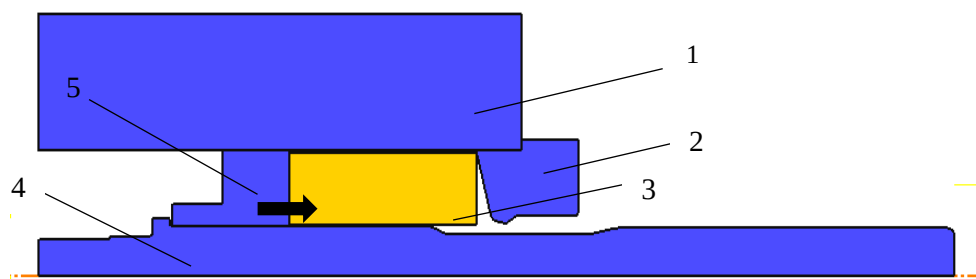


Рис. 3. Исходная сборка инструмента и заготовки: 1 – контейнер; 2 – матрица; 3 – заготовка; 4 – игла; 5 – пресс-штемпер (стрелкой показано направление движения прессового инструмента)

Fig. 3. Initial assembly of the tooling and billet: 1 is container, 2 is die, 3 is billet, 4 is mandrel, 5 is extrusion stem (the arrow indicates the direction of movement of the extrusion tooling)

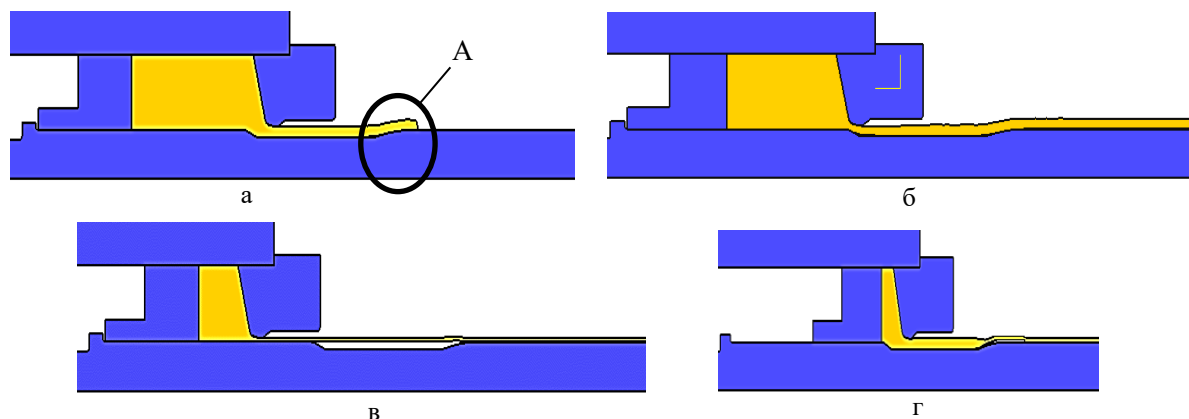


Рис. 4. Стадии прессования ЛБТ с наружными концевыми утолщениями: а – прессование выходного концевой утолщения (зона А – зона раздачи); б – прессование переходной зоны от выходного концевой утолщения к основному сечению; в – прессование основного сечения; г – прессование утяжинного концевой утолщения

Fig. 4. Stages of extrusion of light-alloy drill pipes with external end thickenings: а is extrusion of the outlet end thickening (zone A – expansion zone); б is extrusion of the transition zone from the outlet end thickening to the main section; в is extrusion of the main section; г is extrusion of the swaged end thickening

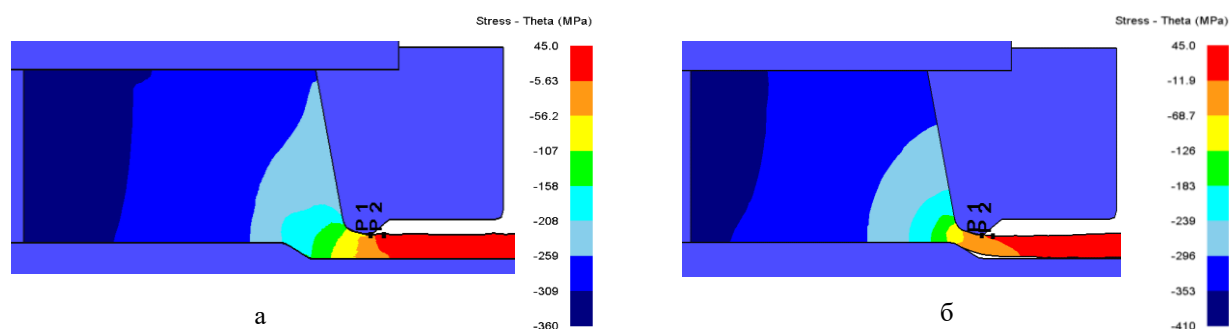


Рис. 5. Распределение тангенциальных напряжений в ОД при прессовании зоны 1 (а) и зоны 2 (б)
Fig. 5. Distribution of tangential stresses in the deformation zone during extrusion of zone 1 (a) and zone 2 (б)

Для удобства определения конкретных значений тангенциальных напряжений на наружной поверхности трубы назначены контрольные точки P1-P2, при этом P1 – в зоне калибрующего пояса матрицы, P2 – в зоне выхода трубы из калибрующего пояса матрицы.

В табл. 1 показаны значения тангенциальных напряжений в контрольных точках P1 и P2 в зонах 1-4 исследуемой трубы.

Здесь видно, что в точке P1 во всех зонах значения тангенциальных напряжений имеют отрицательные значения (сжимающие напряжения), причем в зоне 3 значения $\sigma_{\text{фр}}$ максимальны по модулю. По сравнению с зоной 3 уровень напряжений (по модулю) зоны 1 на 44,1% ниже, зоны 2 – на 54,5% ниже, зоны 4 – на 38,6% ниже.

В точке P2 во всех зонах $\sigma_{\text{фр}}$ имеют положительные значения (растягивающие напряжения), причем в зоне 3 уровень растягивающих напряжений в 9,7 раза ниже, чем в зоне 1, в 2,2 раза ниже, чем в зоне 2, в 4,3 раза ниже, чем в зоне 4. Отметим, что уровень растягивающих тангенциальных напряжений в зоне 4 в 2,2 раза ниже, чем в зоне 1. Здесь можно сделать вывод, что вследствие наличия повышенного уровня тангенциальных растягивающих напряжений зоны 1, 2 и 4 являются

опасными с позиции трещинообразования, причем зона 1 в большей степени.

Также опасным с позиции трещинообразования при прессовании данной трубы является процесс ее раздачи на конусном участке прессовой иглы. На рис. 6 показано распределение тангенциальных напряжений на трех условных стадиях раздачи деформируемой трубы (для зоны 1).

Здесь специально для оценки конкретных значений тангенциальных напряжений назначены контрольные точки. Далее в табл. 2 показаны значения $\sigma_{\text{фр}}$ в контрольных точках на первой, второй и третьей условных стадиях раздачи деформируемой трубы (для зоны 1).

На всех стадиях раздачи наблюдаются зоны растягивающих и сжимающих тангенциальных напряжений по толщине стенки трубы. Здесь важно отметить: от первой к третьей стадии раздачи уровень растягивающих напряжений в контрольных точках становится ниже по модулю, а уровень сжимающих напряжений – выше; передний торец трубы на первой стадии раздачи (рис. 6, а) имеет растягивающие тангенциальные напряжения как во внутреннем слое трубы, так и в наружном (точки P1-P2), однако уровень растягивающих напряжений наружного слоя на 12% выше, чем внутреннего.

Таблица 1. Значения тангенциальных напряжений в контрольных точках P1 и P2 в зонах 1-4 исследуемой трубы
Table 1. Tangential stress values at control points P1 and P2 in zones 1-4 of the investigated pipe

$\sigma_{\text{фр}}$ в P1, МПа (зона 1)	$\sigma_{\text{фр}}$ в P2, МПа (зона 1)	$\sigma_{\text{фр}}$ в P1, МПа (зона 2)	$\sigma_{\text{фр}}$ в P2, МПа (зона 2)	$\sigma_{\text{фр}}$ в P1, МПа (зона 3)	$\sigma_{\text{фр}}$ в P2, МПа (зона 3)	$\sigma_{\text{фр}}$ в P1, МПа (зона 4)	$\sigma_{\text{фр}}$ в P2, МПа (зона 4)
-22,1	16,5	-18,0	3,8	-39,6	1,7	-24,3	7,3

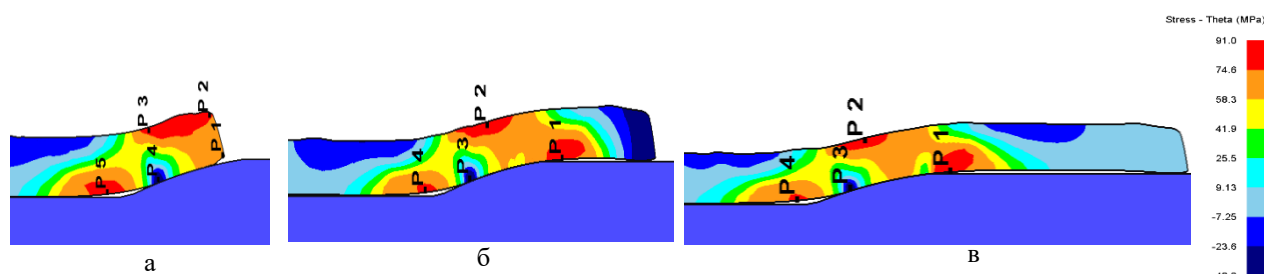


Рис. 6. Распределение тангенциальных напряжений на первой (а), второй (б) и третьей (в) условных стадиях раздачи деформируемой трубы (для зоны 1)

Fig. 6. Distribution of tangential stresses at the first (a), second (б), and third (в) conventional stages of expansion of the deformed pipe (for zone 1)

Таблица 2. Значения $\sigma_{\text{фф}}$ в контрольных точках на первой, второй и третьей условных стадиях раздачи деформируемой трубы (для зоны 1)

Table 2. Values of $\sigma_{\text{фф}}$ at the control points at the first, second, and third conventional stages of expansion of the deformed pipe (for zone 1)

Первая стадия раздачи				
$\sigma_{\text{фф}}$ в P1, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P2, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P3, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P4, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P5, МПа
72,1	81,8	80,6	-26,6	87,5
Вторая стадия раздачи				
$\sigma_{\text{фф}}$ в P1, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P2, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P3, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P4, МПа	
79,2	79,6	-30,5	77,6	
Третья стадия раздачи				
$\sigma_{\text{фф}}$ в P1, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P2, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P3, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P4, МПа	
78,1	78,4	-33,5	73,8	

Также осуществлена оценка тангенциальных напряжений в момент раздачи трубы при формировании зоны 4. Установлено, что в этом случае раздача происходит при меньшем уровне растягивающих $\sigma_{\text{фф}}$ в сравнении с зоной 1. Для примера на рис. 7 приведена стадия раздачи при формировании зоны 4, примерно соответствующая второй стадии при формировании зоны 1 (рис. 6, б).

Сравнивая стадии раздачи, показанные на рис. 6, б и 7, установлено, что распределение $\sigma_{\text{фф}}$ и значения

сжимающих $\sigma_{\text{фф}}$ аналогичны, при этом значения растягивающих $\sigma_{\text{фф}}$ при формировании зоны 4 в среднем на 15% ниже. Можно сделать вывод, что передний торец трубы, в большей степени наружная поверхность трубы, является наиболее опасной зоной с позиции трещинообразования.

Также рассмотрены четыре условные стадии раздачи при прессовании зоны 2 деформируемой трубы (рис. 8).

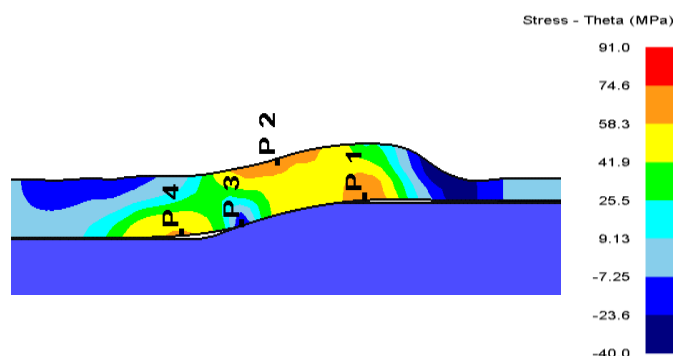


Рис. 7. Стадия раздачи при формировании зоны 4, примерно соответствующая второй стадии при формировании зоны 1

Fig. 7. Expansion stage during the formation of zone 4, approximately corresponding to the second stage during the formation of zone 1

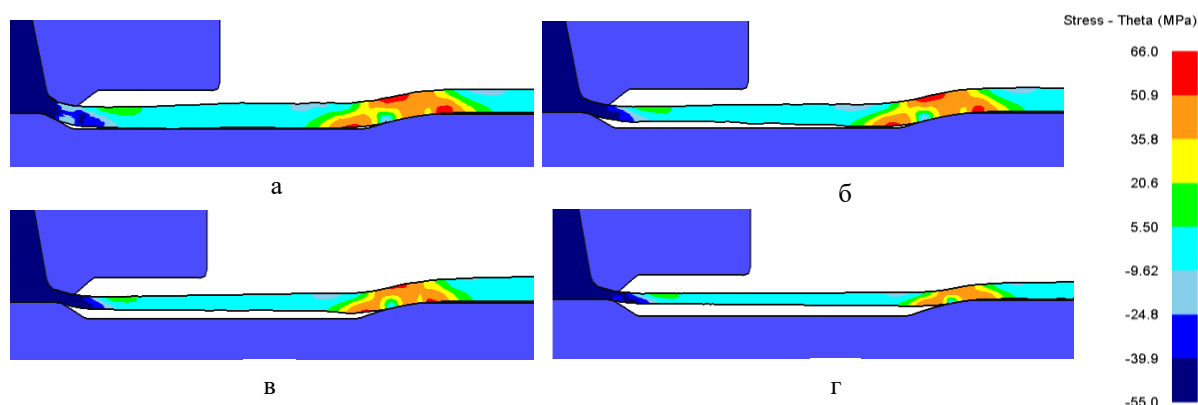


Рис. 8. Распределение тангенциальных напряжений на первой (а), второй (б), третьей (в) и четвертой (г) условных стадиях раздачи деформируемой трубы (для зоны 2)

Fig. 8. Distribution of tangential stresses at the first (a), second (б), third (в), and fourth (г) conventional stages of expansion of the deformed pipe (for zone 2)

Здесь видно формирование переходной зоны трубы от наружного концевой утолщения к основному сечению с плавным уменьшением толщины стенки трубы. Установлено, что максимальные растягивающие тангенциальные напряжения от первой к четвертой стадии понижают свой уровень в 1,8 раза (с 66 до 36 МПа), то есть вероятность появления трещин понижается. Следует специально отметить, что после окончания раздачи зоны 2 наступает прессование зоны 3, где раздача трубы не происходит, а уровень тангенциальных напряжений трубы после выхода из ОД находится на уровне нуля, то есть возникновение трещин вследствие действия тангенциальных напряжений здесь невозможно.

Как уже было отмечено, на формирование трещин также влияет пластичность сплава, одним из влияющих факторов на которую является температура. Известно, что для сплава Д16 наибольшая пластичность находится в интервале температур 400-480°C, а при 490°C начинается ее снижение [23].

Отметим, что на температурное поле имеет влияние скорость истечения, связанная со скоростью прессования соотношением $V_{ист} = \lambda V_{пресс}$. Кроме того, скорость истечения прямо пропорционально связана со скоростью деформации ξ , на последнюю при этом имеет влияние коэффициент вытяжки – с его увеличением значение скорости деформации повышается. Высокие скорости перемещения металла в пластической зоне могут вызвать значительное увеличение температуры [24].

Известно, что на скорость деформации также влияют, например, значение показателя трения в процессе деформации и длина заготовки, оставшаяся в контейнере на момент оценки скорости деформации

[25]. Однако в условиях данной работы принято упрощение и рассматривается только совместное влияние скорости прессования, коэффициента вытяжки и температуры.

Далее рассмотрено распределение скорости деформации и температуры в исследуемых зонах трубы. На рис. 9 для примера показано распределение скорости деформации при прессовании зон 1 и 2 соответственно, и для оценки конкретных значений ξ для всех рассматриваемых зон назначены контрольные точки Р1 и Р2, где точка Р1 примыкает к наружной поверхности трубы, Р2 – к внутренней.

В табл. 3 показаны значения скорости деформации в контрольных точках Р1 и Р2 и максимальное значение температуры в ОД в зонах 1-4 исследуемой трубы.

Установлено, что увеличение скорости прессования и коэффициента вытяжки при прессовании зоны 3 в сравнении с зонами 1 и 4 привело к значительному увеличению скорости деформации (в 6 раз), что, в свою очередь, привело к значительному разогреву металла в ОД. Специально отметим, что температура металла в ОД превысила свое максимально допустимое значение в известном интервале пластичности для сплава Д16. Можно предположить, что наиболее опасной с позиции разрушения становится зона 3, однако вследствие ее благоприятного напряженного состояния, а также высокого значения коэффициента вытяжки (известно, что при λ , равном 30 и более, для сплава Д16 может произойти рекристаллизация и снятие структурного эффекта) негативное влияние скорости деформации и температуры сводится к минимуму, что подтверждается в условиях реального производства отсутствием в данной зоне дефектов в виде трещин.

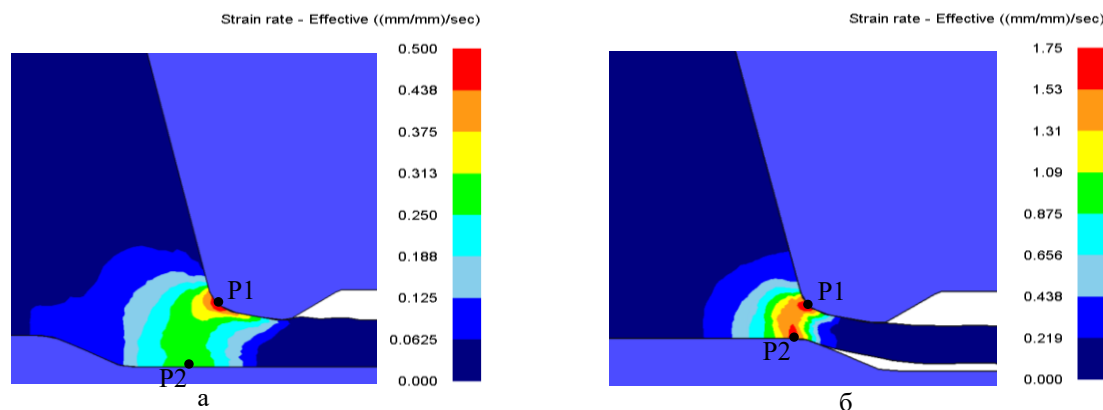


Рис. 9. Распределение скорости деформации при прессовании зоны 1 (а) и 2 (б)

Fig. 9. Distribution of strain rate during extrusion of zones 1 (a) and 2 (б)

Таблица 3. Значения скорости деформации в контрольных точках Р1 и Р2 и максимальное значение температуры в ОД в зонах 1-4 исследуемой трубы

Table 3. Strain rate values at control points P1 and P2 and the maximum temperature in the deformation zone in zones 1-4 of the investigated pipe

ξ в Р1, с ⁻¹ (зона 1)	ξ в Р2, с ⁻¹ (зона 1)	ξ в Р1, с ⁻¹ (зона 2)	ξ в Р2, с ⁻¹ (зона 2)	ξ в Р1, с ⁻¹ (зона 3)	ξ в Р2, с ⁻¹ (зона 3)	ξ в Р1, с ⁻¹ (зона 4)	ξ в Р2, с ⁻¹ (зона 4)
0,5	0,25	1,75	1,75	3	2,12	0,5	0,23
Максимальная температура в ОД, °С							
зона 1		зона 2		зона 3		зона 4	
450		470		500		470	

При прессовании зон 1 и 4 значения скорости прессования и коэффициента вытяжки находятся на одном уровне, при этом максимальное значение скорости деформации также находится на одном уровне. Оценивая расположение максимума скорости деформации (рис. 9, а), можно предположить наибольшее упрочнение наружной поверхности трубы, что является негативным с позиции разрушения. Специально отметим, что трещины в условиях реального производства выявлены именно на наружной поверхности концевых утолщений труб. Также установлено, что температура металла при прессовании данных зон попадает в интервал пластичности, поэтому с этой позиции опасность разрушения здесь минимальна.

При прессовании зоны 2 появляется два локальных максимума скорости деформации (рис. 9, б), в отличие от остальных зон, где он один. В момент прессования этого участка по условиям моделирования скорость прессования еще не увеличена до скорости прессования основного сечения, таким образом, повышение скорости деформации относительно зон 1 и 4 (в 3,5 раза) произошло за счет постепенного уменьшения диаметра трубы (увеличения коэффициента вытяжки). Оценивая расположение скорости деформации, можно предположить значительное упрочнение как наружной, так и внутренней поверхности трубы, что является негативным с позиции разрушения. Однако, вследствие благоприятного напряженного состояния внутренней поверхности трубы, опасной зоной остается наружная поверхность. Специально отметим отсутствие дефектов в виде трещин на внутренней поверхности данного участка и их наличие на наружной (в производственных условиях). Также установлено, что температура металла при прессовании данной зоны попадает в интервал пластичности, поэтому с этой позиции опасность разрушения здесь минимальна.

Также определена максимальная скорость деформации при раздаче для зон 1, 2 и 4. Значение ее

максимума варьируется от 0,07 до 0,11 с⁻¹. Эти значения достаточно низкие для проявления существенно негативного влияния скорости деформации. К тому же температура металла в зоне раздачи всегда находится в интервале пластичности.

С целью поиска более рациональных с позиции минимизации появления трещин параметров процесса осуществлен вариант моделирования при понижении температуры заготовки до 390°C, контейнера, матрицы и пресс-шайбы до 370°C, иглы до 350°C. Данному варианту решения присвоен № 2. Также осуществлен вариант моделирования № 3, где понижено значение скорости движения пуансона во время прессования концевых утолщений до 0,6 мм/с, во время прессования основного сечения – до 1,2 мм/с. В варианте моделирования № 4 понижены вышеуказанные температурные и скоростные параметры.

В табл. 4 показаны значения тангенциальных напряжений в контрольных точках P1 и P2 (расположение точек аналогично рис. 5) в зонах 1-4 исследуемой трубы по результатам решений № 2-4.

Здесь видно, что условия процесса № 2 имеют меньшее влияние на уровень тангенциальных напряжений в контрольных точках исследуемых зон по сравнению с вариантом процесса № 3. При этом наиболее действенным вариантом благоприятной коррекции тангенциальных напряжений является одновременное понижение температурных и скоростных условий процесса (вариант процесса № 4). Исходя из последнего, принято решение сравнить значения тангенциальных напряжений в зоне раздачи для первой зоны трубы в вариантах процесса № 1 и 4. Значения $\sigma_{\text{фф}}$ в контрольных точках на первой и третьей условных стадиях раздачи деформируемой трубы (для зоны 1) в варианте процесса № 4 показаны в табл. 5. Для примера сравнение осуществлено для первой и третьей условных стадий раздачи, расположение контрольных точек соответствует рис. 6.

Таблица 4. Значения тангенциальных напряжений в контрольных точках P1 и P2 в зонах 1-4 исследуемой трубы по результатам решений № 2-4

Table 4. Tangential stress values at control points P1 and P2 in zones 1-4 of the investigated pipe based on the results of Solutions No. 2-4

Номер решения	$\sigma_{\text{фф}}$ в P1, МПа (зона 1)	$\sigma_{\text{фф}}$ в P2, МПа (зона 1)	$\sigma_{\text{фф}}$ в P1, МПа (зона 2)	$\sigma_{\text{фф}}$ в P2, МПа (зона 2)	$\sigma_{\text{фф}}$ в P1, МПа (зона 3)	$\sigma_{\text{фф}}$ в P2, МПа (зона 3)	$\sigma_{\text{фф}}$ в P1, МПа (зона 4)	$\sigma_{\text{фф}}$ в P2, МПа (зона 4)
2	-35,4	10,2	-22,2	2,2	-50,3	-0,2	-33,8	4,8
3	-44,6	6,1	-29,8	1,4	-64,5	-2,2	-46,5	2,7
4	-55,6	0,5	-35,6	0,1	-86,5	-6,2	-56,2	0,3

Таблица 5. Значения $\sigma_{\text{фф}}$ в контрольных точках на первой и третьей условных стадиях раздачи деформируемой трубы (для зоны 1) в четвертом варианте процесса

Table 5. Values of $\sigma_{\text{фф}}$ at the control points at the first and third conventional stages of expansion of the deformed pipe (for zone 1) for the fourth process variant

Номер стадии раздачи	$\sigma_{\text{фф}}$ в P1, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P2, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P3, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P4, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P5, МПа
1	58,3	61,5	62,8	-38,8	67,6
3	61,5	62,3	-45,6	58,4	

Установлено, что вариант процесса № 4 по сравнению с № 1 на вышеуказанных стадиях раздачи также имеет более благоприятный уровень тангенциальных напряжений с позиции минимизации образования продольных трещин.

Далее в условиях реального производства принято решение осуществить прессование труб при температурно-скоростных параметрах процесса, соответствующих варианту процесса № 4. В результате отпрессовано 80 шт. труб, при этом на 3,75% из них выявлены продольные трещины. Таким образом, температурно-скоростной режим процесса № 4 обеспечил в условиях реального производства снижение процента брака по продольным трещинам в 2,6 раза.

Заключение

В результате промышленного прессования легкосплавных бурильных труб с наружными концевыми утолщениями выявлено появление дефекта типа «продольные трещины» на их наружной поверхности в концевых утолщениях и переходных зонах от утолщения к основному сечению.

Установлено, что одной из причин образования выявленных в условиях реального процесса продольных трещин является неблагоприятный уровень тангенциальных растягивающих напряжений как в очаге деформации, так и в зоне раздачи. Дополнительное негативное влияние на концевые утолщения может оказывать повышенное значение скорости деформации, характерное для области, примыкающей к наружной поверхности трубы.

Установлено, что понижение температуры металла заготовки и прессового инструмента на 20°C и скорости движения инструмента на 0,4 мм/с способствует более благоприятному с позиции трещинообразования распределению тангенциальных напряжений, в том числе в зонах обнаружения трещин. Корректировка температурно-скоростных условий процесса на практике привела к уменьшению процента несоответствующей продукции по дефекту «продольные трещины».

Список источников

1. Прохоров С. Алюминий возвращается // Нефть России. 2011. № 6. С. 76-77.
2. Aluminium Drill pipe in an Arctic Application – A Well-known Tool Changing the Development Strategy / Vakhrushev A.V., Gelfgat M.Ya., Basovich D.V., Buyanovskiy I.N. // SPE Arctic and Extreme Environments Conference and Exhibition, Moscow, 2011, 149707. DOI: 10.2118/149707-MS
3. Aluminum Alloy Tubules – Assessment for Ultra long Well Construction / Gelfgat M.Ya., Basovich V.S., Adelman A., Hansen B.R. // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Anaheim, 2007, 109722. DOI: 10.2523/109722-MS
4. Швецов О.В. Повышение эксплуатационной надежности бурильных труб из алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2017. Т. 23. № 1. С. 236-426.
5. Сапунжи В.В. Эффективность применения алюминиевых бурильных труб при бурении скважин на нефть и газ // Бурение и нефть. 2012. № 6-7. С. 48-52.
6. Файн Г.М., Штамбург В.Ф., Даниелянц С.М. Нефтяные трубы из легких сплавов. М.: Недра, 1990. 221 с.
7. Файн Г.М., Макаров Е.М. Состояние и перспективы производства и применение труб нефтепромыслового сортамента из алюминиевых сплавов // Территория Нефтегаз. 2007. № 5. С. 66-71.
8. Ерманок М.З., Каган Л.С., Головинов М.Ф. Прессование труб из алюминиевых сплавов. М.: Metallurgy, 1976. 428 с.
9. Каган Л.С., Ерманок М.З., Ерохов В.К. Прогрессивная технология прессования бурильных труб переменного сечения из алюминиевых сплавов. М.: Изд-во Ин-та «Цветметобработка», 1969. 48 с.
10. Применение термомеханической обработки для повышения прочности прессованных прутков из алюминиевого сплава Д16 / Н.Б. Пугачева, А.В. Разинкин, И.С. Каманцев и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. 2025. № 1. С. 64-73.
11. Кутепова Л.В., Волгина Н.И., Хламкова С.С. Исследование влияния термической обработки на структуру и свойства алюминиевого сплава Д16 // Технология металлов. 2022. № 7. С. 2-7.
12. Kondrat'ev S.Y., Zotov O.G., Shvetsov O.V. Structural stability and variation of properties of aluminum alloys D16 and 1953 in production and operation of drill pipes // Metal Science and Heat Treatment. 2014, vol. 55, pp. 526-532.
13. Микляев П.Г. Механические свойства легких сплавов при температурах и скоростях обработки давлением: справочник. М.: Metallurgy, 1994. 279 с.
14. Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х. Теория прессования металлов. М.: Metallurgy, 1975. 447 с.
15. Влияние напряженного состояния на образование трещин в протекторном утолщении при прессовании легкосплавной трубы / Ю.В. Замараева Ю.В., Ю.Н. Логинов, О.Ф. Дегтярева и др. // Металлообработка. 2025. № 5. С. 27-36.
16. Логинов Ю.Н., Антоненко Л.В. Изучение напряженно-деформированного состояния для предупреждения образования продольных трещин в прессованных трубах // Цветные металлы. 2010. № 5. С. 119-122.
17. Каранашев Р.А. Совершенствование процесса производства бурильных труб из алюминиевых сплавов: автореф. ... дис. канд. техн. наук. М., 1993. 24 с.
18. Каган Л.С. Разработка научных основ прессования с раздачей и технологии производства труб переменного сечения из алюминиевых сплавов: автореф. ... дис. канд. техн. наук. М., 1992. 36 с.
19. Непершин Р.И. Раздача тонкостенной трубы криволинейным жестким пуансоном // Вестник МГТУ Станкин. 2009. № 4. С. 54-60.
20. Каргин В.Р., Афанасьев А.Е., Каргин Б.В. Моделирование процесса прессования бурильных труб с наружными утолщениями // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. № 1-2. С. 215-219.
21. Афанасьев А.Е., Каргин В.Р., Каргин Б.В. Компьютерный анализ процесса раздачи труб прессованием // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. № 2. С. 97-106.

22. Ежов А.А., Герасимова Л.П. Дефекты в металлах. М.: Русский университет, 2002. 359 с.
23. Тофпенец Р.Л., Анисович А.Г., Василбева Л.А. Исследование возможности повышения пластичности литого сплава Д16 // Литье и металлургия. 2002. № 3. С. 30-34.
24. Зимин Л.С., Федотов М.Е. Учёт процессов деформации в технологических комплексах «индукционный нагрев-обработка давлением» // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: технические науки. 2005. № 37. С. 50-54.
25. Логинов Ю.Н., Антоненко Л.В. О скоростных режимах деформирования в контейнере при прямом пресовании // Технология легких сплавов. 2010. № 4. С. 66-72.
12. Kondratev S.Y., Zotov O.G., Shvetsov O.V. Structural stability and variation of properties of aluminum alloys D16 and 1953 in production and operation of drill pipes. *Metal Science and Heat Treatment*. 2014;55:526-532.
13. Miklyaev P.G. *Mekhanicheskie svoistva legkikh spлавov pri temperaturakh i skorostyakh obrabotki davleniem: spravochnik* [Mechanical properties of light alloys at temperatures and pressure treatment rates: reference book]. Moscow: Metallurgiya, 1994, 279 p. (In Russ.)
14. Perlin I.L., Raitbarg L.Kh. *Teoriya pressovaniya metallov* [Theory of metal extrusion]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 447 p. (In Russ.)
15. Zamaraeva Yu.V., Loginov Yu.N., Degtyareva O.F. et al. Influence of stress state on cracks formation in protector thickening at light alloy pipe extrusion. *Metalloobrabotka* [Metalworking]. 2025;(5):27-36. (In Russ.)
16. Loginov Yu.N., Antonenko L.V. Research of the strain-stress state for the prevention of longitudinal splits formation in the extruded pipes. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous metals]. 2010;(5):119-122. (In Russ.)
17. Karanashev R.A. *Sovershenstvovanie protsessa proizvodstva buril'nykh trub iz alyuminievykh spлавov: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improving the production process of aluminum alloy drill pipes. Extended abstract of Ph.D. dissertation]. Moscow, 1993, 24 p.
18. Kagan L.S. *Razrabotka nauchnykh osnov pressovaniya s razdachey i tekhnologii proizvodstva trub peremennogo secheniya iz alyuminievykh spлавov: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of scientific foundations extrusion with distribution and technology of production of pipes of variable cross-section from aluminum alloys. Extended abstract of Ph.D. dissertation]. Moscow, 1992, 36 p.
19. Nepershin R.I. Thin-walled tube extension by curved rigid punch. *Vestnik MGTU Stankin* [Bulletin of MSTU Stankin]. 2009;(4):54-60. (In Russ.)
20. Kargin V.R., Afanasyev A.E., Kargin B.V. Modeling the process of boring pipes with the external thickening pressings. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2016;(1-2):215-219. (In Russ.)
21. Afanasyev A.E., Kargin V.R., Kargin B.V. Computer analysis of distribution tubes pressing. *Internet-zhurnal Naukovedenie* [Online Journal of Science Studies]. 2016;(2):97-106. (In Russ.)
22. Ezhov A.A., Gerasimova L.P. *Defekty v metallakh* [Defects in metals]. Moscow: Russkiy universitet, 2002, 359 p. (In Russ.)
23. Toфпенетс Р.Л., Анисович А.Г., Василбева Л.А. Investigation of the possibility of increasing the plasticity of cast alloy D16. *Litie i metallurgiya* [Casting and metallurgy]. 2002;(3):30-34. (In Russ.)
24. Zimin L.S., Fedotov M.E. Consideration of deformation processes in technological complexes "induction heating-pressure processing". *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Samara State Technical University. Series: technical sciences]. 2005;(37):50-54. (In Russ.)
25. Loginov Yu.N., Antonenko L.V. On strain rate conditions in the container during direct extrusion. *Tekhnologiya legkikh spлавov* [Technology of Light Alloys]. 2010;(4):66-72. (In Russ.)

References

1. Prokhorov S. Aluminum is coming back. *Neft Rossii* [Russian Oil]. 2011;(6):76-77. (In Russ.)
2. Vakhrushev A.V., Gelfgat M.Ya., Basovich D.V., Buyanovskiy I.N. Aluminium Drill pipe in an Arctic Application – A Well-known Tool Changing the Development Strategy. SPE Arctic and Extreme Environments Conference and Exhibition. Moscow, 2011, 149707. DOI: 10.2118/149707-MS
3. Gelfgat M.Ya., Basovich V.S., Adelman A., Hansen B.R. Aluminum Alloy Tubules – Assessment for Ultra long Well Construction. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Anaheim, 2007, 109722. DOI: 10.2523/109722-MS
4. Shvetsov O.V. Improving the operational reliability of drill pipes of aluminium alloys D16T and 1953T1. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU* [Scientific-technical statement of SPbPU]. 2017;23(1):236-426. (In Russ.)
5. Sapunzhi V.V. Use efficiency of aluminium drill pipes during oil and gas wells' drilling. *Burenie i neft* [Drilling and oil]. 2012;(6-7):48-52. (In Russ.)
6. Fain G.M., Shtamburg V.F., Danelyants S.M. *Neftyanye truby iz legkikh spлавov* [Light alloy oil pipes]. Moscow: Nedra, 1990, 221 p. (In Russ.)
7. Fain G.M., Makarov E.M. The state and prospects of production and application of oilfield grade pipes made of aluminum alloys. *Territoriya Neftegaz* [Neftegaz Territory]. 2007;(5):66-71. (In Russ.)
8. Ermanok M.Z., Kagan L.S., Golovinov M.F. *Pressovanie trub iz alyuminievykh spлавov* [Extrusion of aluminum alloy pipes]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 248 p. (In Russ.)
9. Kagan L.S., Ermanok M.Z., Erokhov V.K. *Progressivnaya tekhnologiya pressovaniya buril'nykh trub peremennogo secheniya iz alyuminievykh spлавov* [Advanced technology of extrusion drill pipes of variable cross-section made of aluminum alloys]. Moscow: Tsvetmetobrabotka Publishing House, 1969, 48 p. (In Russ.)
10. Pugacheva N.B., Razinkin A.V., Kamantsev I.S. et al. Application of thermomechanical treatment to increase the strength of extruded rods made of aluminum D16 alloy. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal science and heat treatment of metals]. 2025;(1):64-73. (In Russ.)
11. Kutepova L.V., Volgina N.I., Khlamkova S.S. Influence study of heat treatment on structure and properties of alumina alloy D16. *Tekhnologiya metallov* [Metal technology]. 2022;(7):2-7. (In Russ.)

Поступила 26.01.2026; принята к публикации 20.02.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 26/01/2026; revised 20/02/2026; published 30/09/2026

Замараева Юлия Валентиновна – кандидат технических наук, научный сотрудник,
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия;
начальник отдела,
АО «Каменск-Уральский металлургический завод», Каменск-Уральский, Россия.
Email: zamaraevajulia@yandex.ru. ORCID 0000-0002-2620-7064

Логинов Юрий Николаевич – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник,
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия;
профессор кафедры обработки металлов давлением,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.
Email: j.n.loginov@urfu.ru. ORCID 0000-0002-5874-5422

Дегтярева Ольга Федоровна – кандидат технических наук,
заместитель генерального директора по технологии и качеству,
ООО «Бурильные трубы», Каменск-Уральский, Россия.
Email: DegtyarevaOF@kumw.ru.

Разинкин Александр Викторович – кандидат технических наук, директор по производству,
АО «Каменск-Уральский металлургический завод», Каменск-Уральский, Россия.
Email: RazinkinAV@kumz.ru. ORCID 0009-0006-2851-227X

Yuliya V. Zamaraeva – PhD (Eng.), Researcher,
M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, Russia;
Head of Department,
JSC Kamensk-Uralsky Metallurgical Works, Kamensk-Uralsky, Russia.
Email: zamaraevajulia@yandex.ru. ORCID 0000-0002-2620-7064

Yuriy N. Loginov – DrSc (Eng.), Professor, Leading Researcher,
M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, Russia;
Professor of the Department of Pressure Metal Treatment,
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.
Email: j.n.loginov@urfu.ru. ORCID 0000-0002-5874-5422

Olga F. Degtyareva – PhD (Eng.), Deputy General Director for Technology and Quality,
LTD Drill Pipes, Kamensk-Uralsky, Russia.
Email: DegtyarevaOF@kumw.ru.

Alexander V. Razinkin – PhD (Eng.), Production Director,
JSC Kamensk-Uralsky Metallurgical Works, Kamensk-Uralsky, Russia.
Email: RazinkinAV@kumz.ru. ORCID 0009-0006-2851-227X

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.778; 621.884
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-54-62



ВЛИЯНИЕ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛА ЗАГОТОВОК НА ВЕЛИЧИНУ НАПРЯЖЕНИЙ В ИНСТРУМЕНТЕ ПРИ ХОЛОДНОЙ ВЫСАДКЕ ЗАКЛЕПОК

Бурлаков И.А.^{1,2}, Деметрашвили И.С.³, Харитонов С.А.⁴

¹Филиал АО «ОДК» «ОДК-Салют», Москва, Россия

²Московский политехнический университет (Мосполитех), Москва, Россия

³Филиал АО «ОДК» «НИИД», Москва, Россия

⁴Машиностроительное конструкторское бюро «Горизонт» (Филиал АО «ОДК» «МКБ „Горизонт”»), Дзержинский, Россия

Аннотация. **Актуальность работы.** Необходимость повышения стойкости инструмента для холодной высадки заклепок, широко применяемых в авиационной промышленности. Высокие циклические нагрузки приводят к разрушению оснастки, а использование составного инструмента с бандажированными твердосплавными вставками требует оптимизации его параметров, в частности величины натяга, с учетом свойств высаживаемого материала. **Цель исследования.** Определение влияния прочности материала заготовок на напряженное состояние составного пуансона и разработка методики выбора рационального натяга в оснастке. **Используемые методы.** Методом конечно-элементного моделирования в среде QForm 11.2.400.3 изучен процесс холодной высадки заклепок из шести материалов: никелевого сплава ХН60ВТ, стали 12Х18Н10Т, меди М1 и алюминиевых сплавов АД0, Д16, АМг5. Проведены натурные эксперименты по высадке заклепок с регистрацией силовых параметров для проверки моделей. **Новизна.** Принципиальной новизной является следующее: при высадке более мягких алюминиевых сплавов в пуансоне возникают более высокие сжимающие напряжения (до 1300 МПа), чем при работе с более прочными материалами, такими как сталь или никелевый сплав (до 850 МПа). Это благоприятно сказывается на стойкости твердосплавной вставки, работающей преимущественно на сжатие. На основе аналитической модели толстостенных цилиндров (Ламе) разработана расчетная методика, связывающая предел текучести материалов заклепки и инструмента, его свойства и геометрию, которая позволяет определить диапазон рациональных натягов, исключающих как сдвиг вставки, так и пластическую деформацию обоймы. **Практическая значимость.** Получение инженерной модели, позволяющей при проектировании оснастки учитывать прочностные характеристики конкретного заклепочного материала для выбора рационального натяга, что повышает ресурс инструмента и технологическую надежность процесса.

Ключевые слова: холодная высадка, заклепка, составной инструмент, напряжения в инструменте, натяг, заклепочные материалы, моделирование, твердый сплав, QForm 11.2.400.3

© Бурлаков И.А., Деметрашвили И.С., Харитонов С.А., 2026

Для цитирования

Бурлаков И.А., Деметрашвили И.С., Харитонов С.А. Влияние прочности материала заготовок на величину напряжений в инструменте при холодной высадке заклепок // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 54-62. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-54-62>



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

INFLUENCE OF BLANK MATERIAL STRENGTH ON TOOL STRESSES DURING COLD HEADING OF RIVETS

Burlakov I.A.^{1,2}, Demetrashvili I.S.³, Kharitonov S.A.⁴

¹Branch of JSC UEC Salut, Moscow, Russia

²Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

³Branch of JSC UEC NIID, Moscow, Russia

⁴Gorizont Machine-Building Design Bureau (Branch of JSC UEC Gorizont Machine-Building Design Bureau), Dzerzhinsky, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The research is aimed at improving the durability of tooling for cold heading of rivets, which are widely used in the aerospace industry. High cyclic loads result in tooling failure, while the use of a composite tool with shroud carbide inserts requires optimization of its parameters, particularly the interference fit value, taking into account the properties of the material being headed. **Objectives.** The research is aimed at determining the effect of blank material strength on the stress state of a composite puncheon and developing a methodology for selecting an optimal interference fit. **Methods Applied.** Finite element modeling in QForm 11.2.400.3 has been used to investigate the cold heading of rivets made of six materials: KhN60VT nickel alloy, 12Kh18N10T stainless steel, M1 copper, and AD0, D16, and AMg5 aluminum alloys. Full-scale experiments on rivet heading have been conducted with recording of force parameters to validate the models. **Originality.** The principal novelty of the study is that heading softer aluminum alloys generates higher compressive stresses in the puncheon (up to 1300 MPa) than heading stronger materials such as steel or nickel alloy (up to 850 MPa). This has a beneficial effect on the service life of the carbide insert, which operates predominantly under compression. Based on the analytical model of thick-walled cylinders (Lamé's equations), a calculation methodology has been developed that relates the yield strengths of the rivet and tool materials, their properties, and geometry, making it possible to determine a range of optimal interference values that prevent both insert displacement and plastic deformation of the outer sleeve. **Practical Relevance.** The proposed engineering model makes it possible to account for the strength characteristics of a specific rivet material when designing tooling and selecting an optimal interference fit, thereby increasing tool life and process reliability.

Keywords: cold heading, rivet, composite tool, tool stresses, interference fit, rivet materials, modeling, carbide, QForm 11.2.400.3

For citation

Burlakov I.A., Demetrashvili I.S., Kharitonov S.A. Influence of Blank Material Strength on Tool Stresses During Cold Heading of Rivets. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 54-62. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-54-62>

Введение

Изготовление клепаных высокопрочных соединений из алюминиевых, титановых и жаропрочных стальных листов является непростой задачей, которая зависит от ряда факторов, в том числе и от качества получаемых заклепок, которое определяется механическими характеристиками штампуемого металла, силовыми параметрами процесса высадки и конструкцией применяемой штамповой оснастки [1]. Ряд авторов отмечают [2], что в настоящее время невозможно решить задачи обеспечения высокого качества соединений без учета формирования заданных свойств крепежного узла путем комплексного анализа всей конструкторско-технологической цепочки проектирования. Одним из критически важных этапов данной цепочки является изготовление заклепок методом холодной высадки. Как правило, ее производят на холодновысадочных автоматах, которые имеют большую производительность, достигающую 300–400 заготовок в минуту и этим обуславливаются высокие требования к эксплуатационной стойкости инструмента.

Высокие ударные нагрузки приводят к износу и разрушению формообразующих частей инструмента. Наряду с такими известными способами повышения работоспособности оснастки, как применение дорогих высокопрочных материалов, использование электроэрозионного легирования, поверхностной термической обработки, лазерного упрочнения и нанесения износостойких покрытий, широко применяют метод изготовления составного инструмента, включающего в себя вставку из твердого сплава типа ВК10 или ВК15, бандажированную с натягом высокопрочной обоймой. Это позволяет существенно снизить вероятность появления критических для твердого сплава растягивающих напряжений и уменьшить вероятность выхода из строя формообразующего инструмента [3]. Несмотря на эффективность данного способа повышения стойкости высадочного инструмента, в литературе имеется весьма ограниченное количество информации, касающейся влияния величины натяга на напряженное состояние инструмента, динамики напряжений в твердосплавных вставках в про-

цессе высадки деталей и зависимостей напряженного состояния инструмента от прочности материала высаживаемых заклепок. Решению данных вопросов посвящено настоящее исследование.

Целью работы являлось определение влияния прочностных характеристик основных материалов заклепок на напряжения, возникающие в формообразующем инструменте.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- найдены реологические зависимости заклепочных (никелевого сплава ХН60ВТ, жаропрочной стали 12Х18Н10Т, меди М1 и алюминиевых сплавов АД0, Д16 и АМг5) и инструментальных (ВК15 и 4Х5МФ1С) материалов и выполнено моделирование процесса холодной высадки с применением программного комплекса QForm 11.2.400.3 из исследуемых материалов с определением силовых параметров и напряженного состояния в инструменте (на примере пуансона);

- разработана расчетная модель для определения рациональной величины натяга в составном инструменте, обеспечивающего его работоспособность при высадке заклепок из материалов с различными прочностными характеристиками;

- осуществлена экспериментальная высадка заклепок из исследуемых деформируемых материалов с

регистрацией силовых параметров и выполнен сравнительный анализ данных, полученных моделированием и натурными испытаниями.

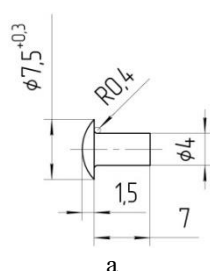
Материалы и методы исследования

Реологические модели жаропрочной стали 12Х18Н10Т и алюминиевых сплавов Д16 и АД0 были взяты из базы данных программного комплекса QForm [4]. Характеристики меди М1 [5], сплава АМг5 [6] и никелевого сплава ХН60ВТ были определены авторами ранее и верифицированы в ходе натурных экспериментов [7, 8]. Модель инструментальной стали 4Х5МФ1С также была выбрана из базы данных QForm; модель сплава ВК15 – из литературных источников [9, 10].

Экспериментальные цилиндрические образцы диаметром 4,0 мм и высотой 10,85 мм изготовили из исследуемых материалов электроэрозионной резкой. Высадку осуществили на испытательной машине модели LFM 250 с применением серийной оснастки со скоростью перемещения инструмента 2 мм/мин, фиксируя диаграммы «сила – ход».

Получаемые детали показаны на **рис. 1**.

Вставки матрицы 1 (**рис. 2**) и пуансона 3 изготовлены из твердого сплава ВК15, обойма 5 – из стали 4Х5МФ1С.



ХН60ВТ



М1



АМг5

Рис. 1. Изготавливаемая деталь: а – эскиз; б – высаженные заклепки

Fig. 1. Manufactured part: a is sketch; b is headed rivets

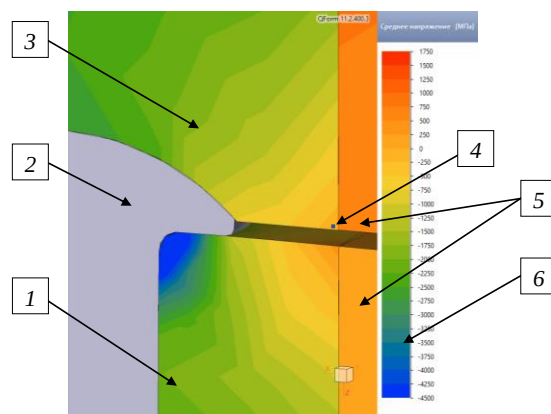


Рис. 2. Распределение напряжений в инструменте при холодной высадке заклепок: 1 – матрица; 2 – заготовка; 3 – пуансон; 4 – трассируемая точка; 5 – бандажирующая обойма; 6 – шкала средних напряжений

Fig. 2. Stress distribution in the tool during cold heading of rivets: 1 is die; 2 is blank; 3 is punch; 4 is monitored point; 5 is outer sleeve; 6 is mean stress scale

Моделирование выполнили с учетом режимов натурального эксперимента с условиями, что объем заготовки неизменный, напряженное состояние трехмерное (3D-расчет), температура формообразования – 20°C, а фактор трения равен 0,2 (по закону трения Ливанова). Расчет выполнили с величинами натяга 0, 0,05, 0,1 и 0,15 мм. Напряжения в инструменте анализировали методом трассируемых точек. Суммарное количество объемных узлов составило 7 399–8 222. Анализ провели на пуансоне с учетом его более низкой стойкости.

Разработка расчетной модели для определения рационального натяга. На основе анализа напряженно-деформированного состояния составного инструмента и условий его работоспособности авторами разработана расчетная модель. Данная модель представляет собой систему уравнений, позволяющую определить диапазон рациональных натягов δ , обеспечивающих требуемую несущую способность соединения «обойма–вставка» без риска повреждения оснастки.

Модель основана на двух основных критериях:

1. Условие отсутствия сдвига вставки: сила трения на посадочной поверхности должна превышать осевую силу высадки.

2. Условие прочности обоймы: контактное давление от натяга не должно вызывать пластическую деформацию бандажирующей обоймы.

Система связывает воедино ключевые технологические и конструктивные параметры:

– свойства материала заготовки – предел текучести $\sigma_{\text{т.закл}}$, необходимый для расчета технологической силы высадки и, соответственно, минимального требуемого контактного давления;

– свойства материалов инструмента – модули упругости обоймы и вставки E_1, E_2 соответственно; коэффициенты Пуассона обоймы и вставки μ_1, μ_2 соответственно и предел текучести материала обоймы $\sigma_{\text{т.об}}$, определяющие упругую реакцию сборки на натяг и предельно допустимую нагрузку;

– геометрию оснастки – диаметр вставки d , наружный диаметр обоймы D и посадочную длину L , которые влияют на площадь контакта и концентрацию напряжений;

– коэффициенты процесса – коэффициент формы инструмента $k = 1,8$, установленный на основе анализа энергосиловых параметров высадки, и коэффициент трения покоя f в паре «обойма–вставка» (переменный).

Таким образом, на основе анализа известных решений теории упругости для толстостенных цилиндров (формула Ламе) и собственных экспериментальных данных разработана методика выбора рациональных параметров составного инструмента – натяга δ и диаметра обоймы D , учитывающая прочностные свойства высаживаемого материала через коэффициент $k = 1,8$.

Уравнения модели:

$$p_{\text{нат.мин}} \geq \frac{(p_{\text{тр.об}} d)}{(4Lf)}; \delta_{\text{мин}} = p_{\text{нат.мин}} d \left(\frac{c_1}{E_1} + \frac{c_2}{E_2} \right).$$

$$p_{\text{нат.макс}} = \sigma_{\text{т.об}} \left(\frac{D^2 - d^2}{D^2 + d^2} \right); \delta_{\text{макс}} = p_{\text{нат.макс}} d \left(\frac{c_1}{E_1} + \frac{c_2}{E_2} \right).$$

$$\delta_{\text{мин}} = \frac{(\sigma_{\text{т.закл}} kd)}{(4Lf)} d \left(\frac{\left(1 - \frac{\mu_1}{E_1}\right) + \left(\frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} + \mu_2\right)}{E_2} \right);$$

$$\delta_{\text{макс}} = \sigma_{\text{т.об}} \left(\frac{D^2 - d^2}{D^2 + d^2} \right) d \left(\frac{\left(1 - \frac{\mu_1}{E_1}\right) + \left(\frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} + \mu_2\right)}{E_2} \right).$$

Работоспособный диапазон натягов определяется неравенством

$$\delta_{\text{мин}} \leq \delta \leq \delta_{\text{макс}}.$$

Представленные на **рис. 3** зависимости давления на поверхности контакта обоймы и вставки от диаметра обоймы позволяют определить минимальный натяг для высадки заклепок с конкретными механическими свойствами. Как известно из классических работ, например Ландау и Лифшица [11], величина давления на поверхности p определяется как среднее скалярное значение нормальных напряжений. Кривые средних напряжений, найденные конечно-элементным моделированием в программе QForm для обоймы диаметром 25 мм при натяге 0,1 мм, показали хорошее совпадение с результатами, полученными с применением разработанной расчетной модели (**рис. 4**), что подтверждает ее корректность.

Анализ полученных данных

Результаты анализа напряжений в пуансоне в зависимости от величины натяга методом трассируемых точек показаны на **рис. 5**.

Анализ результатов расчета, приведенных на **рис. 5**, показывает, что при холодной высадке заклепок из алюминиевых сплавов (АД0, Д16 и АМг5) при наиболее широко применяемых натягах 0,05–0,10 пуансон испытывает в наиболее нагруженных точках 4 (см. **рис. 2**) значительно большие сжимающие напряжения (от 700 до 1300 МПа), чем медь М1, сталь 12Х18Н10Т и никелевый сплав ХН60ВТ (от 450 до 850 МПа), что должно положительно сказаться на стойкости оснастки при высадке деталей из алюминиевых сплавов.

Помимо сжимающих напряжений в твердосплавном инструменте, на его стойкость большое влияние, как отмечает ряд авторов [8], оказывает циклическое нагружение. Величина напряжений в процессе высадки (см. **рис. 5**) изменяется от 250 МПа (для стали 12Х18Н10Т) до 650 МПа (для сплава ХН60ВТ). Учитывая большое количество ходов в минуту холодновысадочных автоматов (до 400), большая амплитуда изменений напряжений в процессе циклического нагружения при высадке приводит к усталостному разрушению

твердосплавных вставок [8] и, следовательно, выход оснастки из строя при высадке заклепок из никелевого сплава ХН60ВТ более ожидаем, чем при изготовлении заклепок из стали 12Х18Н10Т.

Для проверки адекватности полученных результатов были проведены натурные испытания по высадке заклепок из рассматриваемых материалов с регистрацией параметров «сила-ход».

Полученные результаты (рис. 7) показали относительно хорошее совпадение с расчетными (средняя погрешность не превышала 8–12 %), что подтверждает адекватность использованных реологических моделей и корректность проведенного численного анализа.

Выполненная работа показывает, что при проектировании оснастки с применением вставок из твердого сплава для холодной высадки заклепок необходимо при определении натяга учитывать прочностные свойства заклепочного материала.

Заключение

1. С применением найденных реологических свойств высаживаемых материалов выполнено моделирование процесса холодной высадки в программном комплексе QForm 11.2.400.3. Моделирование с определением силовых параметров и напряженного состояния в инструменте (на примере пуансона) показало, что при высадке заклепок из алюминиевых сплавов (АД0, Д16 и АМг5) с наиболее распространенными натягами 0,05–0,10 мм пуансон испытывает в наиболее нагруженных точках 4 (см. рис. 2) значительно большие сжимающие напряжения (от 700 до 1300 МПа), чем при работе с медью М1, сталью 12Х18Н10Т и никелевым сплавом ХН60ВТ (от 450 до 850 МПа), которые должны положительно сказаться на стойкости оснастки при высадке деталей из алюминиевых сплавов.

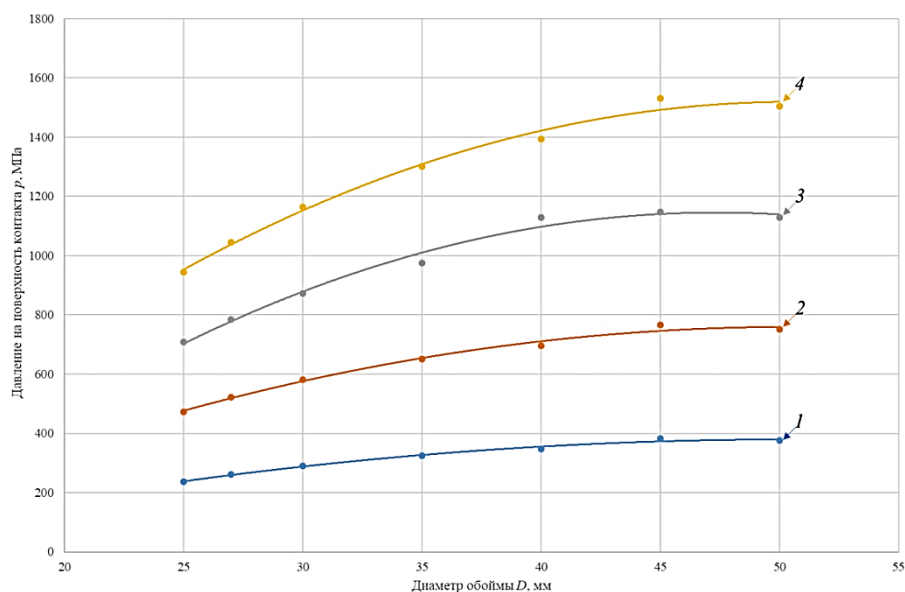


Рис. 3. Зависимости давления на поверхности контакта от диаметра обоймы из стали 4Х5МФС: 1 – $\delta = 0,05$ мм; 2 – $\delta = 0,10$ мм; 3 – $\delta = 0,15$ мм; 4 – $\delta = 0,20$ мм

Fig. 3. Dependence of contact surface pressure on the diameter of the 4Kh5MFC steel sleeve: 1 is $\delta = 0.05$ mm; 2 is $\delta = 0.10$ mm; 3 is $\delta = 0.15$ mm; 4 is $\delta = 0.20$ mm

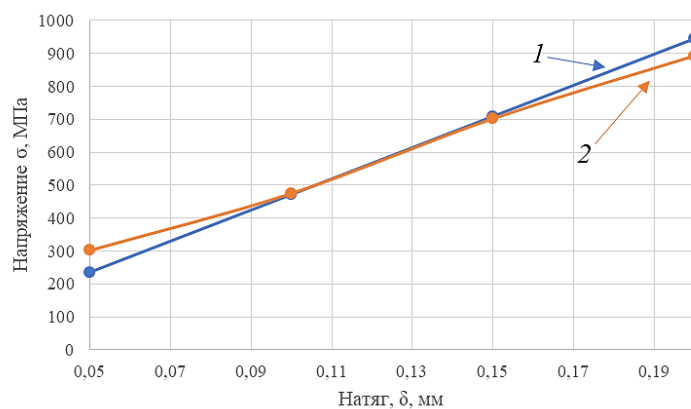


Рис. 4. Сравнение расчетных зависимостей: 1 – расчетная модель; 2 – конечно-элементная модель

Fig. 4. Comparison of the calculated relationships: 1 is analytical model; 2 is finite element model

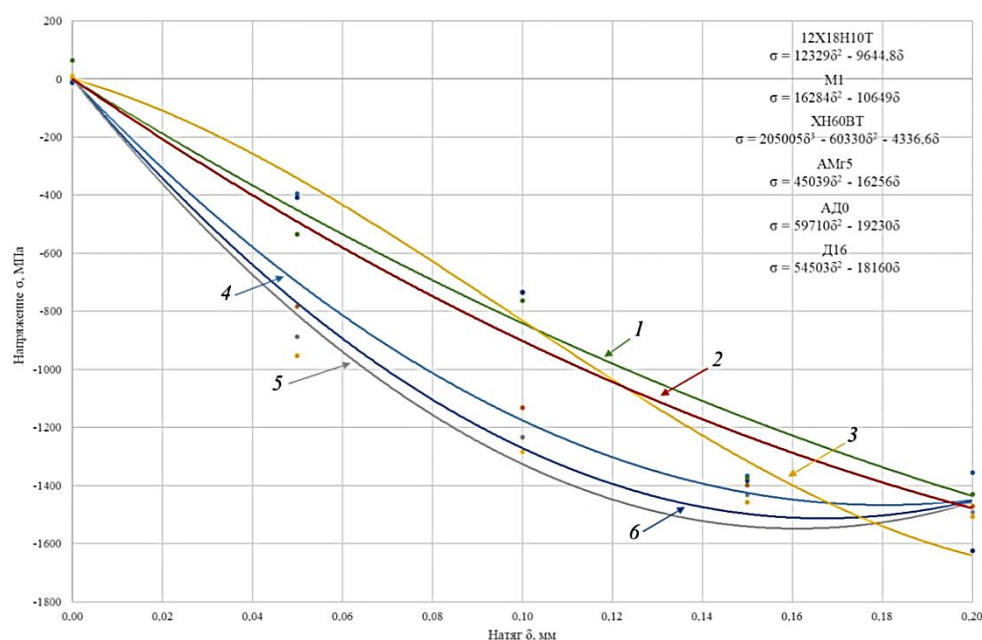


Рис. 5. Влияние натяга на напряжения в пуансоне: 1 – сталь 12X18H10T; 2 – медь М1; 3 – никелевый сплав ХН60ВТ; 4 – алюминиевый сплав АМг5; 5 – алюминиевый сплав АД0; 6 – алюминиевый сплав Д16

Fig. 5. Effect of interference fit on stresses in the puncheon: 1 is 12Kh18N10T steel; 2 is M1 copper; 3 is KhN60VT nickel alloy; 4 is AMg5 aluminum alloy; 5 is AD0 aluminum alloy; 6 is D16 aluminum alloy

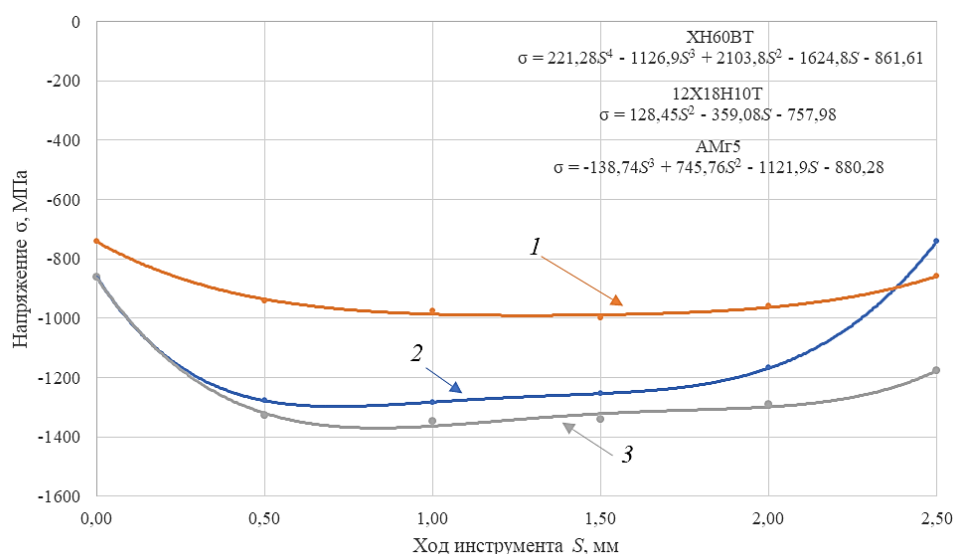


Рис. 6. Изменение напряжений в пуансоне в процессе высадки: 1 – сталь 12X18H10T; 2 – никелевый сплав ХН60ВТ; 3 – алюминиевый сплав АМг5

Fig. 6. Variation of stresses in the puncheon during heading: 1 is 12Kh18N10T steel; 2 is KhN60VT nickel alloy; 3 is AMg5 aluminum alloy

2. Разработана расчетная модель, связывающая прочностные свойства материала заклепки, характеристики материалов инструмента и его геометрию. Модель позволяет рассчитать рациональную величину натяга в составном инструменте, обеспечивающую его надежную работу без пластической деформации обоймы или сдвига твердосплавной вставки.

3. Выполнен анализ напряженного состояния ин-

струмента по высадке заклепок, полученных моделированием и натурным экспериментом, показано их качественное и количественное совпадение. Показано, что моделирование с применением найденных реологических моделей материалов дает возможность проектировать оснастку с твердосплавными вставками с определением величины натяга с учетом прочностных свойств материала высаживаемых заклепок.

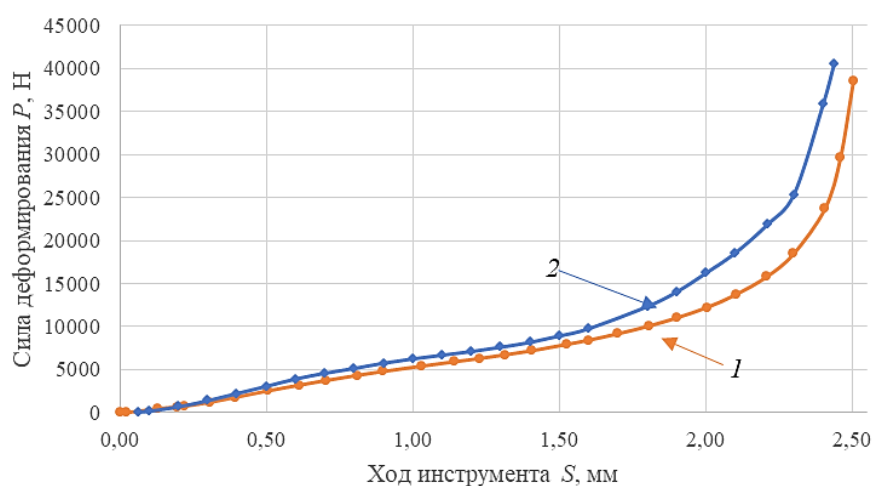
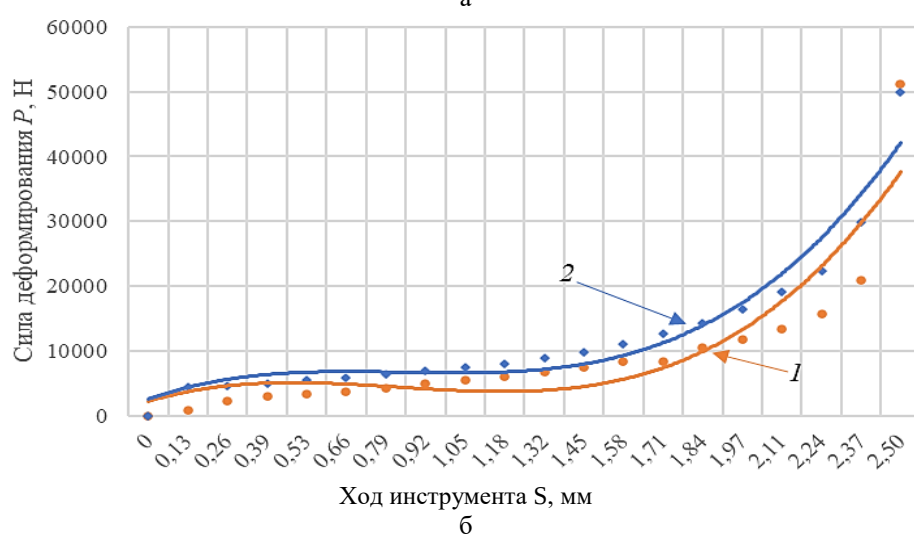
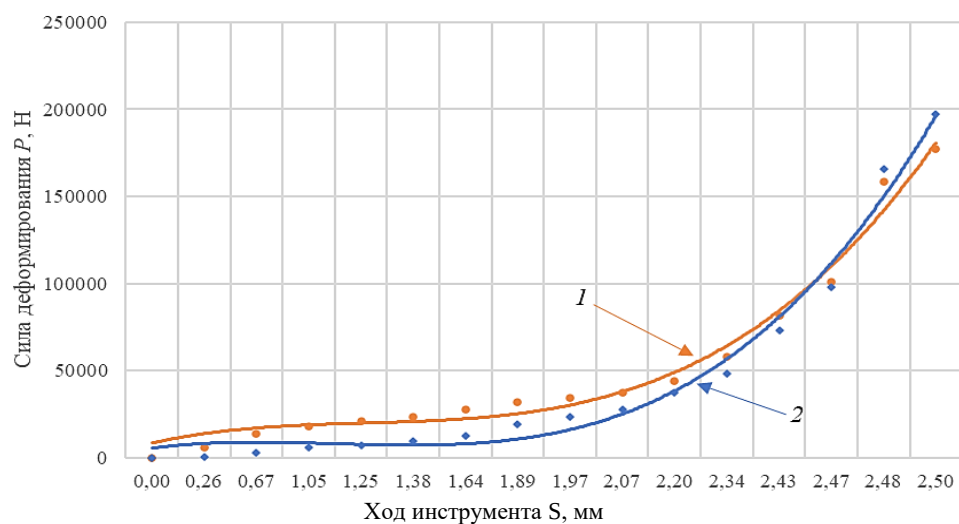


Рис. 7. Сравнение расчетных (1) и экспериментальных (2) сил формообразования заклепок из:
а – никелевого сплава ХН60ВТ; б – меди марки М1; в – алюминиевого сплава АМr5

Fig. 7. Comparison of calculated (1) and experimental (2) forming forces for rivets made of: a is KhN60VT nickel alloy; b is M1 copper; c is AMg5 aluminum alloy

Список источников

- Данов А.С. О континуальной теории дефектов // Вопросы механики деформируемого твердого тела. 1984. Вып. 2. С. 33-37.
- Данов А.С. Выбор параметров высокоресурсных соединений высокопрочными заклепками с компенсаторами и ограничительными элементами // Авиационно-космическая техника и технология. 2015. № 10 (127). С. 11-14.
- Степанкин И.Н. Стойкость холодновысадочной оснастки и методы ее повышения. Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2014. 197 с.
- Руководство пользователя системы QFORM (в электронном виде), ООО «КванторФорм», 2023.
- Определение реологической модели меди М1 / А.Д. Куликов, П.А. Петров, И.С. Деметрашвили и др. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 9. С. 722-731.
- Построение кривых текучести алюминиевого сплава АМг5 на основе натурного и вычислительного эксперимента / П.А. Петров, Фам Ван Нгок, И.А. Бурлаков и др. // Технология легких сплавов. 2022. № 2. С. 65-74.
- Грибов Е.В., Иванов С.Ю. Напряженное состояние составного инструмента с твердосплавной вставкой при холодном выдавливании // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2019. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/napryazhennoe-sostoyanie-sostavnogo-instrumenta-s-tverdospлавной-vstavkoy-pri-holodnom-vydavlivanii> (дата обращения: 06.11.2025).
- Смирнов С.В., Петренко В.А. Особенности разрушения твердых сплавов при циклическом нагружении // Вестник машиностроения. 2018. № 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-razrusheniya-tverdyh-splavov-pri-tsiklicheskom-nagruzhenii> (дата обращения: 06.11.2025).
- ТУ 48-19-209-88. Сплавы твердые спеченные. Заготовки изделий из вольфрамовых особомелкозернистых твердых сплавов марок ВК10-ХОМ и ВК15-ХОМ.
- ГОСТ 3882-74. Сплавы твердые спеченные. Марки. М.: Изд-во стандартов, 2008. 12 с.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: учеб. пособие для вузов. В 10 т. Т. VII. Теория упругости. 5-е изд., стер. М.: Физматлит, 2003. 264 с.
- mechanics of deformable solids]. 1984;(2):33-37. (In Russ.)
- Danov A.S. Selection of parameters for high-endurance joints with high-strength rivets featuring compensators and limiting elements. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* [Aerospace engineering and technology]. 2015;(10(127)):11-14. (In Russ.)
- Stepankin I.N. *Stoikost kholodnovysadochnoi osnastki i metody ee povysheniya* [Durability of cold heading tooling and methods for its improvement]. Gomel: P.O. Sukhoi State Technical University of Gomel Publishing House, 2014, 197 p. (In Russ.)
- QFORM System User Guide (electronic version), QuantorForm Ltd., 2023.
- Kulikov A.D., Petrov P.A., Demetrashevili I.S. et al. Determination of the rheological model for M1 copper. *Izvestiya Tulskego gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences]. 2024;(9):722-731. (In Russ.) doi: 10.24412/2071-6168-2024-9-722-723
- Petrov P.A., Pham Van Ngok, Burlakov I.A. et al. Construction of flow curves for AMg5 aluminum alloy based on full-scale and computational experiment. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of light alloys]. 2022;(2):65-74. (In Russ.)
- Gribov E.V., Ivanov S.Yu. Stress state of a composite tool with a hard-alloy insert in cold extrusion. *Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and stamping production. Material forming]. 2019;(1). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/napryazhennoe-sostoyanie-sostavnogo-instrumenta-s-tverdospлавной-vstavkoy-pri-holodnom-vydavlivanii> (Accessed on November 11, 2025).
- Smimov S.V., Petrenko V.A. Features of hard alloy fracture under cyclic loading. *Vestnik Mashinostroyeniya* [Vestnik of Mechanical Engineering]. 2018;(5). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-razrusheniya-tverdyh-splavov-pri-tsiklicheskom-nagruzhenii> (Accessed on November 11, 2025).
- Technical Specification TU 48-19-209-88. Sintered hard alloys. Blanks for products made of tungsten extra-fine-grained hard alloys of VK10-KhOM and VK15-KhOM grades.
- State standard GOST 3882-74 (ISO 513-75). Sintered hard alloys. Grades. Moscow: Standards Publishing House, 2008, 12 p. (In Russ.)
- Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoreticheskaya fizika: ucheb. posobie dlya vusov* [Theoretical Physics: study guide for universities]. Volume 7: Theory of Elasticity. Moscow: Fizmatlit, 2003, 264 p. (In Russ.)

References

Поступила 09.02.2026; принята к публикации 11.03.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 09/02/2026; revised 11/03/2026; published 30/09/2026

Бурлаков Игорь Андреевич – доктор технических наук, главный специалист УГТ, Филиал АО «ОДК» «ОДК-Салют», Москва, Россия.
Email: iaburlakov@gmail.com. ORCID 0000-0002-9427-0217

Деметрашвили Ирина Сергеевна – инженер-технолог 1-й категории, Филиал АО «ОДК» «НИИД», Москва, Россия.
Email: i.demetrashevili@uecrus.com. ORCID 0009-0002-2363-0198

Харитонов Сергей Александрович – начальник технологического бюро,
Филиал АО «ОДК» «МКБ „Горизонт”», Дзержинский, Россия.
Email: s.Kharitonov@uecrus.com

Igor A. Burlakov – PhD, Chief Specialist,
Branch of JSC UEC Salut, Moscow, Russia
Email: iaburlakov@gmail.com. ORCID 0000-0002-9427-0217

Irina S. Demetrashvili – Process Engineer First Grade,
Branch of JSC UEC NIID, Moscow, Russia.
Email: i.demetrashvili@uecrus.com. ORCID 0009-0002-2363-0198

Sergey A. Kharitonov – Head of the Technology Bureau,
Gorizont Machine-Building Design Bureau (Branch of JSC UEC Gorizont Machine-Building Design Bureau),
Dzer-zhinsky, Russia
Email: s.Kharitonov@uecrus.com

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ MATERIAL PROCESS ENGINEERING

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

УДК 621.8: 658

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-63-72



РАСЧЕТ СИЛ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ ЗАКАЛЕННЫХ СТАЛЕЙ В ТЯЖЕЛЫХ УСЛОВИЯХ РЕЗАНИЯ

Воробьев А.А.¹, Терентьев А.В.², Покровская О.Д.², Степанов А.А.², Загородний Н.А.³

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

² Государственный университет управления, Москва, Россия

³ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия

Аннотация. При восстановительной обработке железнодорожных колёс традиционные подходы к нормированию режимов резания, основанные на усреднённых значениях прочности и однородности материала, утрачивают высокую достоверность. Это обуславливает необходимость перехода от глобальных эмпирических зависимостей к локальным, геометрически и физически адаптированным моделям, способным учитывать пространственную неоднородность поля дефектов и соответствующую вариабельность контактных нагрузок вдоль режущей кромки. Цель работы заключается в разработке термомеханической модели, предназначенной для определения сил резания при точении термически упрочнённых сталей в условиях увеличенной толщины срезаемого слоя. В настоящей работе предпринята попытка разработки модели, которая учитывает прямое воздействие на силы резания множества факторов, а также косвенного влияния условий резания. Разработанная модель расчета сил резания имеет прикладное значение для анализа и оптимизации условий обработки поверхности. В связи с особенностями взаимодействия инструмента с материалом заготовки, зависящей от геометрии режущей кромки, физико-механических свойств обрабатываемого материала, режимов резания и условий смазочно-охлаждающей среды, аналитическое описание этих сил сопряжено со значительными трудностями. Применение данной модели позволит оптимизировать режимы резания и форму режущего лезвия с учетом требуемых отклонений обработанного профиля существенно быстрее традиционных методов. Это способствует снижению времени на переход производства на качественно новые технологические требования. Проведено сопоставление результатов численного моделирования с экспериментальными данными, подтверждающее адекватность предложенного подхода. Выполнено исследование влияния режимов обработки и геометрии режущих кромок в плане на компоненты сил резания, а также на величину упругопластических отклонений обработанной поверхности, обусловленных этими силами.

Ключевые слова: термомеханическая модель, силы резания, закаленная сталь, железнодорожное колесо

Данная статья подготовлена в рамках выполнения научно-исследовательской работы, реализуемой за счет средств федерального бюджета (источник финансирования – Минобрнауки РФ) по теме: «Научно-исследовательские, методологические и практические основы управления технологическими процессами реверсивного инжиниринга при решении комплексных задач импортозамещения в транспортной отрасли машиностроения Российской Федерации» (шифр научной темы FZNW-2024-0013).

© Воробьев А.А., Терентьев А.В., Покровская О.Д., Степанов А.А., Загородний Н.А., 2026

Для цитирования

Расчет сил при токарной обработке закаленных сталей в тяжелых условиях резания / Воробьев А.А., Терентьев А.В., Покровская О.Д., Степанов А.А., Загородний Н.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 63-72. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-63-72>



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

CALCULATION OF FORCES IN THE TURNING OF HARDENED STEELS UNDER HEAVY CUTTING CONDITIONS

Vorobyov A.A.¹, Terentyev A.V.², Pokrovskaya O.D.², Stepanov A.A.², Zagorodny N.A.³

¹ Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russia

² State University of Management, Moscow, Russia

³ Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

Abstract. In the restorative machining of railway wheels, traditional approaches to the determination of cutting conditions based on averaged values of material strength and homogeneity are losing their reliability. This necessitates a transition from global empirical relationships to local, geometrically and physically adaptive models capable of accounting for the spatial heterogeneity of the defect field and the corresponding variability of contact loads along the cutting edge. The study is aimed at developing a thermomechanical model for determining cutting forces during the turning of thermally hardened steels under conditions of increased chip thickness. The present study attempts to develop a model that accounts for the direct effect of multiple factors on cutting forces, as well as the indirect influence of cutting conditions. The developed cutting-force calculation model is of practical significance for the analysis and optimization of surface machining conditions. Due to the specific nature of the interaction between the tool and workpiece material, which depends on the geometry of the cutting edge, the physicomaterial properties of the machined material, cutting conditions, and the conditions of the cutting-cooling medium, the analytical description of these forces is associated with considerable difficulties. The application of the proposed model will make it possible to optimize cutting conditions and cutting-edge geometry while taking into account the required deviations of the machined profile, significantly faster than traditional methods. This contributes to reducing the time required to transition production to qualitatively new technological requirements. A comparison of the numerical simulation results with experimental data has been performed, confirming the adequacy of the proposed approach. The influence of machining conditions and cutting-edge geometry in plan on the components of cutting forces, as well as on the magnitude of elastic-plastic deviations of the machined surface caused by these forces, has been investigated.

Keywords: thermomechanical model, cutting forces, hardened steel, railway wheel.

This article was prepared as part of a research project funded by the federal budget (funding source is the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation) entitled "Scientific, methodological, and practical foundations for managing reverse engineering processes in addressing complex import substitution challenges in the transport engineering industry of the Russian Federation" (research topic code: FZNW-2024-0013).

For citation

Vorobyov A.A., Terentyev A.V., Pokrovskaya O.D., Stepanov A.A., Zagorodny N.A. Calculation of Forces in the Turning of Hardened Steels Under Heavy Cutting Conditions. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 63-72. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-63-72>

Введение

Токарная обработка крупногабаритных закалённых стальных деталей осуществляется в условиях, характеризующихся повышенной сложностью резания. В процессе восстановительной токарной обработки профиля железнодорожных колёс отмечается существенная неоднородность, как по величине припуска, так и по твёрдости обрабатываемой поверхности. Такая нестабильность обусловлена разнообразием эксплуатационных повреждений, накапливающихся на поверхности катания колеса в ходе движения подвижного состава. Наиболее распространёнными дефектами являются ползуны, навары, неравномерный износ и подрезы гребня, каждый из которых формирует локальные зоны с изменённой микроструктурой и повышенной прочностью. Вследствие этого в отдельных случаях, например при устранении

подрезов гребня, глубина резания может достигать 14–16 мм, а локальная твёрдость поверхности в зонах, поражённых ползунами, превышать 6700 МПа [1]. Указанные факторы обуславливают возникновение существенных компонент сил резания, что предъявляет повышенные требования к жёсткости технологической системы и стойкости применяемого режущего инструмента.

Большие значения сил резания увеличивают вероятность поломки режущей пластины и вызывают значительные отклонения обработанной поверхности, что затрудняет обеспечение технологических требований, предъявляемых к поверхностям деталей. Так, например, наметившаяся в последние годы тенденция перехода на высокие скорости движения подвижного состава (свыше 200 км/ч), требует расширения (обоснования) регламентируемых ГОСТ 11018 - 2011 значений допуска радиального биения круга катания

железнодорожного колеса для новых условий эксплуатации. Это связано с тем, что радиальное биение при высоких скоростях приводит к возникновению вибраций колесной пары, что, в свою очередь, увеличивает нагрузки на подшипниковые узлы состава, приводя к высокой вероятности их разрушения. Следовательно, разработка модели расчета сил резания с целью анализа и оптимизации условий обработки является актуальной задачей.

В условиях восстановительной обработки железнодорожных колёс, характеризующейся высокой нестационарностью съёмного припуска и локальной изменчивостью механических свойств поверхностного слоя, традиционные подходы к нормированию режимов резания, базирующиеся на усреднённых значениях прочности и однородности материала, теряют свою достоверность. Это обуславливает необходимость перехода от глобальных эмпирических зависимостей к локальным геометрически и физически адаптированным моделям, способным учитывать пространственную неоднородность поля дефектов и соответствующую вариабельность контактных нагрузок вдоль режущей кромки.

Материалы и методы исследования

Силы резания оказывают принципиальное влияние на точность формообразования и качество обработанной поверхности, в частности на её шероховатость, поскольку определяют деформационные и тепловые процессы в зоне резания. Вследствие сложной природы взаимодействия инструмента с материалом заготовки, зависящей от геометрии режущей кромки, физико-механических свойств обрабатываемого материала, режимов резания и условий смазочно-охлаждающей среды, аналитическое описание этих сил сопряжено со значительными трудностями. Поэтому в инженерной практике и научных исследованиях преобладают эмпирические модели, основанные на обобщении результатов многофакторных экспериментов. Такие модели, как правило, представляют собой произведение степенных зависимостей от основных технологических параметров – глубины резания, подачи и скорости резания, дополненное обобщённым корректирующим коэффициентом. Значение этого коэффициента уточняется посредством подстановки конкретных условий обработки и экспериментально определённых величин сил резания, что позволяет адаптировать модель к заданному сочетанию материала, инструмента и режимов обработки.

Вместе с тем, благодаря исследованиям Н.Н. Зорева [2], А.М. Розенберга [3], Ю.А. Розенберга [4], М.Ф. Полетики [5], В.С. Кушнера [6], Р.Ф. Рехта [7] и других учёных, были разработаны теоретические методы расчёта сил резания, обладающие значительными преимуществами по сравнению с чисто эмпирическими подходами, в частности более высокой обобщающей способностью, физической обоснованно-

стью и применимостью за пределами диапазонов экспериментальных данных.

Теоретические модели, основанные на физико-механическом анализе процесса стружкообразования, позволяют не только прогнозировать силовые характеристики в условиях, не охваченных экспериментальными данными, но и выявлять причинно-следственные связи между структурно-механическими свойствами обрабатываемого материала и динамикой контактного взаимодействия в зоне резания. Такой подход особенно значим при обработке упрочнённых и неоднородных поверхностей, где локальные изменения микроструктуры, обусловленные эксплуатационными повреждениями, приводят к существенной дисперсии механических характеристик в пределах одной и той же заготовки.

В многочисленных исследованиях, а также при разработке нормативных рекомендаций по режимам резания принималось допущение о пропорциональности сил, действующих на передней поверхности режущего инструмента, площади поперечного сечения срезаемого слоя S_t и фактическому пределу прочности материала заготовки при растяжении S_b :

$$R_z = K_z S_b S_t, \quad (1)$$

$$R_v = K_v S_b S_t. \quad (2)$$

Коэффициенты пропорциональности в указанных соотношениях интерпретируются как удельные силы стружкообразования. Их значения определялись как на основе экспериментальных данных, так и аналитически – через фундаментальные параметры процесса стружкообразования. В частности, Эрнст, Мерчант и другие исследователи предложили соответствующие зависимости:

$$K_z = \frac{\tau_y}{S_b} \frac{\cos \omega}{\cos(\varphi_y + \omega) \sin \varphi_y}, \quad (3)$$

$$K_v = \frac{\tau_y}{S_b} \frac{\sin \omega}{\cos(\varphi_y + \omega) \sin \varphi_y}. \quad (4)$$

Различия обусловлены исключительно разными подходами к определению угла наклона условной плоскости сдвига φ_y и угла действия ω . Однако последующие экспериментальные исследования, выполненные Н.Н. Зоревым, М.Ф. Полетикой и рядом других авторов, показали, что данная модель не учитывает влияния ряда реальных факторов. Вследствие этого теоретические значения углов демонстрируют значительные отклонения от экспериментально зарегистрированных данных. Эти расхождения указывают на необходимость корректировки исходных гипотез модели либо использования эмпирических зависимостей, учитывающих специфику конкретных условий резания.

$$\varphi_y = \frac{\pi}{4} - \frac{\omega}{2} = \frac{\pi}{4} - \frac{\eta}{2} - \frac{\gamma}{2}. \quad (5)$$

В работах Н.Н. Зорева, А.М. Розенберга и др. угол φ_y определялся через экспериментально измеренную усадку стружки ζ :

$$\varphi_y = \arctg \frac{\cos \gamma}{\zeta - \sin \gamma}. \quad (6)$$

Для определения угла φ_y и угла действия ω Н.Н. Зоровым [2] использовалось эмпирическое соотношение:

$$\varphi_y + \omega = c. \quad (7)$$

А.М. Розенберг [3] определял указанные углы из условия эквивалентности удельных работ, затрачиваемых при сжатии и резании.

При выводе соответствующих соотношений принималось допущение, согласно которому взаимодействие стружки с режущим инструментом описывается законом внешнего трения. В рамках этой гипотезы предполагалось, что касательные напряжения в зоне стружкообразования τ_y и коэффициент трения μ не зависят от угла наклона условной плоскости сдвига φ_y , что значительно упрощает аналитическое описание процесса резания, однако ограничивает точность модели при анализе реальных условий обработки.

Вместе с тем экспериментальные данные свидетельствуют о том, что фактическое трение на контактной поверхности между стружкой и инструментом является сложным физико-механическим процессом, зависящим не только от свойств материалов, но и от геометрии контакта, температуры, скорости деформации и других факторов. Альтернативный подход, предложенный В.С. Кушнером [6], заключается в отказе от традиционного коэффициента трения μ в пользу набора физически обоснованных характеристик. Такой подход позволяет более точно учитывать реальное распределение напряжений и энергетические потери при резании, а также обеспечивает лучшую согласованность теоретических результатов с экспериментальными данными. В частности, в этой модели вводятся такие параметры, как длина контакта стружки с передней поверхностью режущего инструмента и средние удельные силы, действующие в зоне этого контакта:

$$K_v = \frac{\bar{q}_F}{S_b} \frac{c}{a} \frac{1}{\zeta} \frac{\zeta - \sin \gamma}{\cos \gamma} - \frac{\bar{\tau}}{S_b} \frac{\zeta + \frac{1}{\zeta} - 2 \sin \gamma}{\cos \gamma} \operatorname{tg} \gamma, \quad (8)$$

$$K_\xi = \frac{\bar{\tau}}{S_b} \frac{\zeta + \frac{1}{\zeta} - 2 \sin \gamma}{\cos \gamma} + \frac{\bar{q}_F}{S_b} \frac{c}{a} \frac{1}{\zeta}. \quad (9)$$

В процессе резания возникает необходимость количественной оценки средних удельных сил, действующих как в плоскости сдвига, так и на передней поверхности режущего инструмента. Эти силы напрямую влияют на энергетические затраты при обработке, качество формируемой поверхности и износ инструмента. Одновременно с этим требуется определение геометрических характеристик контактной зоны между стружкой и передней поверхностью резца, в частности её длины, поскольку именно эта величина определяет условия трения, теплообразования и распределения напряжений в зоне резания.

Для расчёта длины контактной зоны в литературе предложены различные аналитические зависимости, учитывающие физико-механические особенности процесса стружкообразования. Среди наиболее значимых работ следует отметить исследования А. М. Розенберга, М. Ф. Полетики, М. И. Клушина, Н. Г. Абуладзе и ряда других авторов, предложивших модели, основанные на балансе сил в зоне резания, гипотезах о распределении нормальных и касательных напряжений, а также на эмпирических корреляциях, полученных в результате экспериментальных исследований.

Указанные подходы не противоречат друг другу, а взаимно дополняют: один из них описывает процессы, протекающие в зоне внешнего трения, тогда как другой отражает условия, характерные для области пластической деформации. Исследованию сил и контактных напряжений, действующих на заднюю поверхность инструмента, посвящены работы Н.Н. Зорева [2], А.М. Розенберга и А.Н. Еремина [3], Ю.А. Розенберга и С.И. Тахмана [4], М.Ф. Полетики и В.В. Мелихова [8], М.Х. Утешева и В.А. Сеникова [9] и ряда других авторов. В указанных исследованиях использовались разнообразные экспериментальные методы для анализа силового взаимодействия между режущим инструментом и обрабатываемой заготовкой. Одним из подходов являлось измерение суммарных компонент сил резания с последующим их разложением на составляющие, обусловленные, в частности, взаимодействием задней поверхности инструмента с уже сформированной поверхностью детали; при этом параллельно оценивались геометрические параметры износа, прежде всего ширина фаски износа на задней поверхности. Для повышения точности локализации силовых эффектов применялись специализированные разрезные динамометрические резцы, конструкция которых включала косую щель, обеспечивающую пространственное разделение областей контакта и, как следствие, возможность более достоверного определения вклада задней поверхности в общие силы резания. Дополнительно для изучения характера контактного взаимодействия на рабочих поверхностях инструмента использовались методы, основанные на принципах поляризационной оптики, позволяющие визуализировать и количественно оценивать распределение контактных напряжений в реальном времени; аналогичные результаты достигались также с применением методов термоиндикации,

тензометрирования и цифровой корреляции изображений, что обеспечивало комплексный подход к анализу трибологических процессов в зоне резания.

В рамках теоретического анализа Н.Н. Зоревым была предложена модель расчёта сил, действующих на заднюю поверхность инструмента, в основе которой лежит допущение о том, что удельные нормальные напряжения определяются пределом прочности упрочнённого поверхностного слоя заготовки, полученного в условиях статического нагружения (рис. 1):

$$q_{N_1} \approx \frac{HB}{3} \approx \sigma_b. \quad (10)$$

При этом касательные удельные силы определялись в соответствии с известным законом:

$$q_{F_1} = \mu q_{N_1} \approx 0,6 q_{N_1}. \quad (11)$$

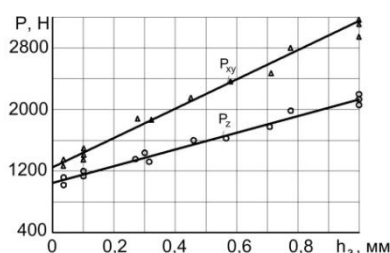


Рис. 1. Влияние ширины фаски износа задней поверхности на проекции силы резания (сталь 40 ХНМА, $t = 2$ мм, $V = 1,25$ м/с) по экспериментальным данным Н.Н. Зорева

Fig. 1. Effect of the width of the flank wear land on the projections of the cutting force (40KhNMA steel, $t = 2$ mm, $V = 1.25$ m/s) according to the experimental data of N.N. Zorev

Экспериментальные данные об удельных касательных напряжениях, полученные Н.Н. Зоревым, свидетельствуют о том, что уровень указанных напряжений соответствует условиям упругопластического контакта между обрабатываемой деталью и режущим инструментом.

Полученные результаты и их обсуждение

При расчёте сил резания особую сложность представляет определение нормальных напряжений на задней поверхности инструмента в пределах застойной зоны, что обусловлено отсутствием прямых экспериментальных методов их измерения в условиях реального процесса обработки. В связи с этим в настоящей работе принимается гипотеза ортогонального отделения стружки в виде «уса» от основного объёма стружки, что позволяет существенно упростить граничные условия контактного взаимодействия. Формирование «уса» рассматривается как характерный признак черновых режимов резания, когда обеспечивается интенсивное пластическое деформирование материала и стабильное прилегание инструмента к поверхности резания. Данная гипотеза пред-

полагает, что контактные поверхности инструмента подвергаются равномерному сжатию, что, в свою очередь, обосновывает допущение о равенстве нормальных напряжений на передней и задней поверхностях инструмента. При этом распределение указанных напряжений принимается равномерным в пределах контактных зон, что согласуется с общепринятой практикой моделирования процессов резания при анализе силовых характеристик и термомеханического состояния режущего клина.

Следовательно, нормальные напряжения, действующие на задней поверхности в пределах области застойной зоны, совпадают с нормальными напряжениями на передней поверхности и могут быть определены по следующей формуле:

$$q_N = \bar{\tau} \frac{a}{f \sin \varphi_y \cos(\varphi_y - \gamma)} + q_F \operatorname{tg}(\varphi_y - \gamma). \quad (12)$$

Исследование особенностей стружкообразования в условиях несвободного резания осуществлялось рядом авторов, включая Н.Н. Зорева [10], Н.И. Резникова [11], Ю.А. Розенберга [4], М.И. Клушина [12], Ю.С. Шарина [13], Г.Л. Куфарова [14] и др. Основное различие в их подходах обусловлено неоднозначной оценкой степени пластической деформации металла в области контакта с вспомогательной режущей кромкой.

В частности, Ю.А. Розенберг указал, что наличие радиуса закругления при вершине резца приводит к формированию переменного угла в плане вдоль активной части режущей кромки. Вследствие этого среднее значение угла в плане $\varphi_{\text{ср}}$ может быть вычислено по формуле

$$\varphi_{\text{ср}} = \frac{1}{2} \arccos \left(1 - \frac{t}{R} \right). \quad (13)$$

Однако при обработке железнодорожных колёс указанное допущение приводит к существенным погрешностям, обусловленным значительной величиной радиуса закругления вершины режущего инструмента ($r = 4-14$ мм).

С целью разработки математической модели, адекватно отражающей влияние радиуса при вершине резца, рассмотрим схему течения с использованием круглого (чашечного) резца либо криволинейного участка режущей кромки с радиусом закругления вершины r (рис. 2).

Для определения сил при прямоугольном течении инструментом с криволинейной режущей кромкой рассмотрим малый элемент этой кромки Δl (см. рис. 2), который аппроксимируется прямолинейным отрезком, ориентированным под локальным углом в плане φ_x к направлению подачи. Такой подход позволяет локализовать анализ процесса резания и свести его к рассмотрению условий стружкообразования в окрестности выделенного элемента. Примем, что равнодействующая элементарных сил, возникающих на передней поверхности инструмента в пределах данного элемента, задаётся двумя проекциями (ΔR_v ,

ΔR_ξ). В силу геометрии процесса эта равнодействующая лежит в плоскости, перпендикулярной элементу Δl , что соответствует плоскости локального стружкообразования, в которой реализуются основные деформационные и силовые взаимодействия между инструментом и материалом заготовки. Учёт локальной ориентации режущей кромки и соответствующей ей плоскости стружкообразования обеспечивает корректное распределение удельных сил резания вдоль всей криволинейной кромки и, как следствие, точное определение интегральных компонент результирующего вектора силы резания:

$$\Delta R_v = K_v S_b a_x \Delta l; \Delta R_\xi = K_\xi S_b a_x \Delta l, \quad (14)$$

где S_b – действительный предел прочности обрабатываемого материала при растяжении; a_x – толщина срезаемого слоя на участке Δl режущей кромки (рис. 3).

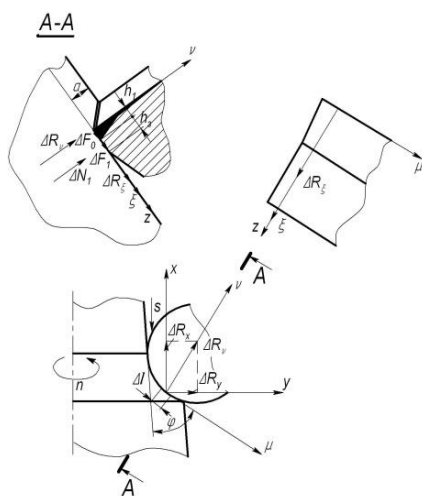


Рис. 2. Схема приращений технологических составляющих силы резания в основной плоскости и в плоскости стружкообразования
Fig. 2. Diagram of increments of the technological components of the cutting force in the principal plane and the chip formation plane

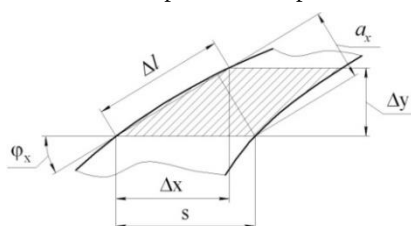


Рис. 3. Геометрия элемента сечения срезаемого слоя
Fig. 3. Geometry of an element of the cross-section of the cut layer

Приращения сил на задней поверхности на участке Δl режущей кромки определяются с учётом установленного в работе условия равенства касательных напряжений в зоне застоя на передней и задней поверхностях инструмента:

$$\Delta N_1 = (q_N f_y \sin \gamma_f + \sigma_b h_3) \Delta l; \Delta F_1 = \mu_1 \sigma_b h_3 \Delta l. \quad (15)$$

Переход от приращений проекций силы резания к интегральным составляющим осуществляется интегрированием по длине режущей кромки l :

$$\begin{aligned} P_x &= \int_L \left[\left(\frac{\Delta R_v}{\Delta l} + \frac{\Delta N_1}{\Delta l} \right) \sin \phi_1 \right] dl, \\ P_y &= \int_L \left[\left(\frac{\Delta R_v}{\Delta l} + \frac{\Delta N_1}{\Delta l} \right) \cos \phi_1 \right] dl, \\ P_z &= \int_L \left[\frac{\Delta R_\xi}{\Delta l} + \frac{\Delta F_1}{\Delta l} \right] dl. \end{aligned} \quad (16)$$

При указанном подходе к определению технологических компонентов силы резания форма режущей кромки может варьироваться в широких пределах. В каждом конкретном случае учёт геометрии режущей кромки при выполнении интегрирования обуславливает получение соответствующих специфических аналитических выражений.

С учётом вышесказанного, интегрируя, для схемы точения с радиусом получим

$$P_y = K_v S_b s t_r \left(1 - \frac{t_r}{2r} \right) + (q_N f_y \sin \gamma_f + \sigma_b h_3) t_r \sqrt{2 \frac{r}{t_r} - 1}; \quad (17)$$

$$\begin{aligned} P_x &= K_v S_b s t_r \left[\frac{r}{2t_r} \arcsin \sqrt{\frac{t_r}{r} \left(2 - \frac{t_r}{r} \right)} - \left(1 - \frac{t_r}{r} \right) \frac{1}{2} \sqrt{2 \frac{r}{t_r} - 1} \right] + \\ &+ (q_N f_y \sin \gamma_f + \sigma_b h_3) t_r; \end{aligned} \quad (18)$$

$$P_z = K_\xi S_b s t_r + (\mu_1 \sigma_b h_3 + q_F h_1) r \arcsin \frac{\sqrt{t_r (2r - t_r)}}{r}, \quad (19)$$

где K_v и K_ξ – удельные силы стружкообразования, значения которых определяются на основе теоретически полученных данных для колёсной стали, включая характеристики усадки стружки и величины касательных напряжений; S_b – действительный предел прочности материала при растяжении; s – подача; t_r – глубина резания, соответствующая участку режущей кромки, выполненному по дуге окружности; r – радиус закругления криволинейной кромки; σ_b – условный предел прочности при растяжении; h_3 – высота фаски износа; ϕ – главный угол в плане; f_y – ширина упрочняющей фаски; γ_f – угол наклона упрочняющей фаски.

Для призматической пластины, содержащей радиусную кромку с радиусом $r = 4$ мм и прямолинейный участок, силы резания определялись путём суммирования вкладов, рассчитанных отдельно для каждого из указанных участков. Такой подход основан на предположении аддитивности силовых компонент, обусловленных геометрически различными зонами контакта инструмента с обрабатываемым материалом.

Экспериментальное исследование сил резания при точении колёсной стали повышенной твердости проводилось в рамках серии испытаний, выполненных при фиксированных режимах резания, включая постоянные значения глубины резания, подачи и скорости резания. Полученные в результате численного интегрирования теоретические значения сил сопоставлялись с данными, измеренными с использованием тензометрического динамометрического стенда, что позволило оценить достоверность принятой модели и выявить степень влияния геометрии режущей кромки на динамику процесса резания. В ходе эксперимента применялась колёсная сталь марки 3 по ГОСТ 398-96 с исходной твердостью ≈ 2800 МПа. Из указанного материала были изготовлены два цилиндрических образца диаметром $d_1 = d_2 = 65,1$ мм соответственно и длиной 300 мм.

Для качественного и количественного определения химического состава бандажной стали использовался рентгеновский спектрометр «СПЕКТРОСКАН МАКС» (МАКС-GV). На основании установленного химического состава образцы подвергались термической обработке, включающей закалку с последующим отпуском, с целью достижения заданных значений твердости. Режимы термообработки подбирались с учётом содержания легирующих элементов, особенно углерода и марганца, влияющих на прокаливаемость стали и конечную микроструктуру с целью достижения заданных значений твердости соответственно $HB_{\text{№1}} = 4510$ МПа, $HB_{\text{№2}} = 3210$ МПа.

Для оценки твердости термически обработанных заготовок применялись динамический твердомер «ТЭМП-2» и пресс Роквелла модели ТК-14-250 №595. Перед началом механической обработки все образцы подвергались контролю геометрических параметров и шероховатости поверхностного слоя, что обеспечивало воспроизводимость результатов при последующем точении. Непосредственная обработка проводилась на токарном станке модели 16K20, при этом варьировались основные параметры режимов резания в пределах, соответствующих рекомендациям для обрабатываемых марок сталей. Для регистрации силовых характеристик процесса использовался электротензометрический динамометр УДМ-600, предварительно прошедший тарировку. Это позволило с высокой точностью определить составляющие силы резания P_x, P_y, P_z . Сравнение экспериментальных данных по силам резания с результатами, рассчитанными по предложенной модели, выявило относительно небольшое отклонение, не превышающее 5% (рис. 4).

Сопоставление проводилось также с известными экспериментальными результатами различных исследователей. Первые экспериментальные данные о силах резания были получены русским учёным Я.Г. Усачёвым в 1912 году [15]. Проведённое сопоставление показало высокое соответствие между экспериментальными результатами Усачёва и теоретическими расчётами (рис. 5).

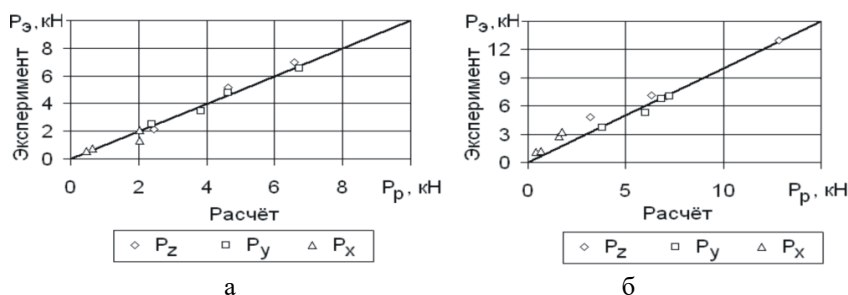


Рис. 4. Сопоставление расчётных сил резания с экспериментальными данными при точении колёсной стали твердостью $HB = 3210\text{--}4510$ МПа: а – резцом с призматической пластиной $r = 4$ мм;

б – резцом с круглой пластиной $r = 15$ мм при $s = 0,7\text{--}1,2$ мм/об; $t = 0,5\text{--}2$ мм; $\varphi = 75^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\lambda = 0^\circ$

Fig. 4. Comparison of calculated cutting forces with experimental data for turning wheel steel with a hardness of $HB = 3210\text{--}4510$ МПа: а is with a tool equipped with a prismatic insert, $r = 4$ mm, and b is with a tool equipped with a round insert, $r = 15$ mm, at $s = 0.7\text{--}1.2$ mm/rev; $t = 0.5\text{--}2$ mm; $\varphi = 75^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\lambda = 0^\circ$

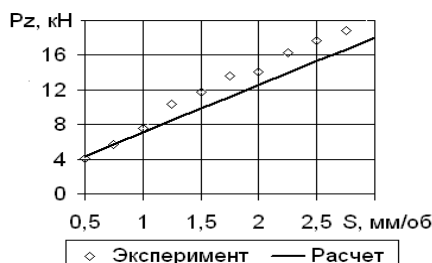


Рис. 5. Сопоставление расчётных данных по силам резания с экспериментом Я.Г. Усачева при точении стали $\sigma_b = 550$ МПа, $\delta = 24\%$ быстрорежущим резцом ($\varphi = 30^\circ$, $\gamma = 30^\circ$, $h_s = 0,5$ мм, $t = 4$ мм, $V = 14$ м/мин)

Fig. 5. Comparison of calculated cutting-force data with the experimental results of Ya.G. Usachev for turning steel with $\sigma_u = 550$ МПа and $\delta = 24\%$ using a high-speed tool with ($\varphi = 30^\circ$, $\gamma = 30^\circ$, $h_s = 0.5$ mm, $t = 4$ mm, $V = 14$ m/min)

При значениях подачи, превышающих 1 мм, наблюдается незначительное расхождение между экспериментальными и расчётными данными. Это расхождение обусловлено, в первую очередь, упругопластической деформацией режущей кромки инструмента, возникающей под действием возросших сил резания. В ходе обработки происходит так называемое «опускание» режущей кромки, что влечёт за собой локальное изменение геометрии инструмента в зоне контакта со срезаемым слоем. Наиболее существенным следствием указанной деформации является изменение фактического переднего угла, что, в свою очередь, влияет на условия стружкообразования и распределение тепловых потоков в режущей зоне. Указанные факторы приводят к отклонению реальных значений сил резания и температур от тех, которые предсказываются расчётными моделями, предполагающими неизменную геометрию инструмента. Таким образом, наблюдаемое расхождение между экспериментом и расчётом при повышенных подачах преимущественно обусловлено деформацией режущей кромки и сопутствующим изменением переднего угла инструмента в процессе резания. Значительный массив экспериментальных исследований, посвящённых анализу сил резания при обработке сталей, был выполнен Н. Н. Зоревым [2] (рис. 6). В частности, сопоставление результатов, полученных для стали марки 60, демонстрирует удовлетворительное соответствие между экспериментальными данными и прогнозами, рассчитанными на основе предложенной модели.

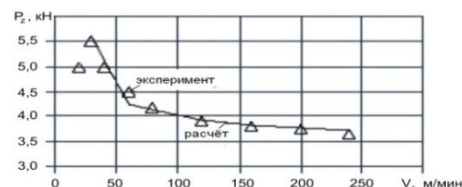


Рис. 6. Экспериментальные зависимости сил резания от скорости резания при точении стали 60 по Н.Н. Зореву: $s = 0,49-0,51$ мм/об; $t = 4$ мм; $\varphi = 60^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\lambda = 0^\circ$; $r = 1$ мм; $h_3 = 0,1$ мм

Fig. 6. Experimental dependences of cutting forces on cutting speed during turning of steel 60 according to N.N. Zorev: $s = 0.49-0.51$ mm/rev; $t = 4$ mm; $\varphi = 60^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\lambda = 0^\circ$; $r = 1$ mm; $h_z = 0.1$ mm

Полученные уравнения, описывающие силы при несвободном резании, были применены к условиям обработки профилей железнодорожных колёс. Установлено, что рост составляющей силы резания P_y , вызванный уменьшением угла в плане при применении резцов, оснащённых призматическими пластинами (рис. 7, а), а также обусловленное этим увеличение упругих деформаций обработанной поверхности, могут быть частично компенсированы за счёт повышения переднего угла инструмента (рис. 7, б).

Установлено, что увеличение глубины резания при обработке колесной стали чашечными резцами ($r = 15$ мм) приводит к существенному увеличению силы P_y (рис. 8).

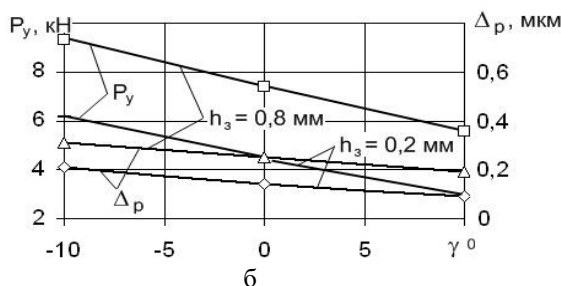
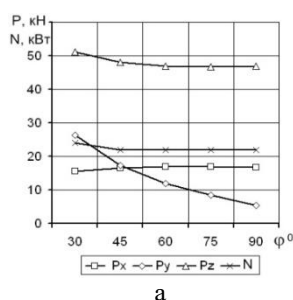


Рис. 7. Влияние угла в плане на силы и мощность резания (а) и переднего угла на силу P_y (б) и связанные с ней отклонения при точении колесной стали (HB = 2580 МПа) резцом Т14К8 ($\varphi = 75^\circ$, $\gamma = 10^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $r = 4$ мм, $V = 28$ м/мин, $s = 1,6$ мм/об, $t = 8$ мм)

Fig. 7. Effect of the angle on cutting forces and power (а), and effect of the rake angle on the P_y force (б) and the associated deviations during turning of wheel steel (HB = 2580 MPa) with a T14K8 tool ($\varphi = 75^\circ$, $\gamma = 10^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $r = 4$ mm, $V = 28$ m/min, $s = 1.6$ mm/rev, $t = 8$ mm)

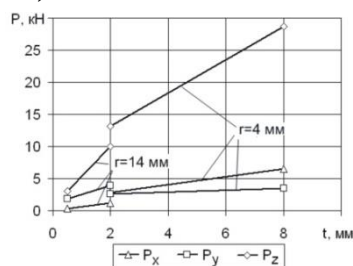


Рис. 8. Влияние глубины на силы резания при точении призматическим ($r = 4$ мм) и чашечным резцом ($r = 14$ мм) стали 60 (HB = 2580 МПа) (резец Т14К8, $\varphi = 75^\circ$, $\gamma = 10^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $s = 1,2$ мм/об, $V = 45$ м/мин)

Fig. 8. Effect of depth of cut on cutting forces during turning of steel 60 (HB = 2580 MPa) with a prismatic tool ($r = 4$ mm) and a cup-type tool ($r = 14$ mm) (T14K8 tool, $\varphi = 75^\circ$, $\gamma = 10^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $s = 1.2$ mm/rev, $V = 45$ m/min)

Заключение

Таким образом, в настоящей статье разработана термомеханическая модель, которая учитывает прямое воздействие на силы резания порядка 1,5 десятка основных факторов, при этом число учитываемых параметров расширяется за счёт учёта косвенного влияния условий резания, опосредованного изменениями температуры в зоне резания. Разработанная модель расчета сил резания имеет прикладное значение для анализа и оптимизации условий обработки поверхности.

Надо полагать, что применение данной модели позволит оптимизировать режимы резания и форму режущего лезвия с учетом требуемых отклонений обработанного профиля существенно быстрее традиционных методов. В свою очередь, это обстоятельство будет способствовать:

- формированию научно-методической основы локальных, геометрически и физически адаптированных моделей, учитывающих пространственную неоднородность поля дефектов и соответствующую переменность контактных нагрузок вдоль режущей кромки;

- нормированию режимов резания при восстановительной обработке железнодорожных колёс с высокой достоверностью;

- снижению времени на переход современного производства на качественно новые технологические требования.

Список источников

1. Влияние структуры и механических характеристик колесных сталей на изнашивание и режимы восстановления профиля колесных пар: монография / В. С. Кушнер, А. А. Крутько, А. А. Воробьев [и др.] ; под ред. И.А. Иванова, В.С. Кушнера. Омск : ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», 2015. 224 с. ISBN 978-5-8149-2014-0. EDN VCBHMY.
2. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. М.: Машгиз, 1956. 386 с.
3. Розенберг А.М., Ерёмин А.Н. Элементы процесса резания металлов. М.: Машгиз, 1956.
4. Розенберг Ю.А., Тахман С.И. Силы резания и методы их определения: учебное пособие. Курган: КМИБ, 1995.
5. Полетика М.Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. М.: Машиностроение, 1969. 148 с.
6. Кушнер В.С. Термомеханическая теория процесса непрерывного резания пластичных материалов. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1982.
7. Рехт Р.Ф. Динамический анализ высокоскоростной обработки резанием // Конструирование и технология машиностроения. 1985. Т. 107. № 4. С. 135-146.
8. Полетика М.Ф., Мелихов В.В. Контактные нагрузки на задней поверхности инструмента // Вестник машиностроения. 1967. №9. С.78-81.
9. Утешев М.Х., Сеников В.А. Напряжённое состояние режущей части инструмента с округлённой ре-

жущей кромкой // Вестник машиностроения. 1967. №9. С. 78-81.

10. Зорев Н.Н. Расчёт проекций силы резания. М.: Машгиз, 1958.
11. Резников Н.И. Учение о резании металлов. М.: Машгиз, 1947.
12. Клушин М.И. Резание металлов. М.: Машгиз, 1958. 454 с.
13. Шарин Ю.С. Исследование некоторых закономерностей процесса резания металлов при изменении отношения подачи к глубине резания в широких пределах : автореф. ... канд. техн. наук. Свердловск, 1953.
14. Куфарев Г.Л., Окенов К.Б., Говорухин В.А. Стружкообразование и качество обработанной поверхности при несвободном резании. Фрунзе: Мектеп, 1970. 170 с.
15. Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов: учебник. М.: Высш шк., 2009. 535 с.: ил.

References

1. Kushner V.S., Krutko A.A., Vorobyev A.A., et al. *Vliyanie struktury i mekhanicheskikh kharakteristik kolesnykh stalei na iznashivanie i rezhimy vosstanovleniya profilya kolesnykh par: monografiya* [Influence of the structure and mechanical characteristics of wheel steels on wear and wheelset profile restoration modes: monograph]. Omsk: Omsk State Technical University, 2015, 224 p. (In Russ.) ISBN 978-5-8149-2014-0. EDN VCBHMY.
2. Zorev N.N. *Voprosy mekhaniki protsessa rezaniya metallov* [Problems of metal cutting mechanics]. Moscow: Mashgiz, 1956, 386 p. (In Russ.)
3. Rozenberg A.M., Eremin A.N. *Elementy protsessa rezaniya metallov* [Elements of the metal cutting process]. Moscow: Mashgiz, 1956. (In Russ.)
4. Rozenberg Yu.A., Takhman S.I. *Sily rezaniya i metody ikh opredeleniya: uchebnoe posobie* [Cutting forces and methods for their determination: textbook]. Kurgan: KMIB, 1995. (In Russ.)
5. Poletika M.F. *Kontaktnye nagruzki na rezhushchikh pov-erkhnostyakh instrumenta* [Contact loads on tool cutting surfaces]. Moscow: Mashinostroenie, 1969, 148 p. (In Russ.)
6. Kushner V.S. *Termomekhanicheskaya teoriya protsessa nepreryvnogo rezaniya plastichnykh materialov* [Thermomechanical theory of the continuous cutting process of ductile materials]. Irkutsk: Irkutsk University Publishing House, 1982. (In Russ.)
7. Rekht R.F. *Dynamic analysis of high-speed machining. Konstruirovaniye i tekhnologiya mashinostroeniya* [Design and technology of machine building]. 1985;107(4):135-146. (In Russ.)
8. Poletika M.F., Melikhov V.V. Contact loads on the flank surface of a tool. *Vestnik Mashinostroeniya* [Vestnik of Mechanical Engineering]. 1967;(9):78-81. (In Russ.)
9. Uteshev M.Kh., Senyukov V.A. Stress state of the cutting part of a tool with a rounded cutting edge. *Vestnik Mashinostroeniya* [Vestnik of Mechanical Engineering]. 1967;(9):78-81. (In Russ.)
10. Zorev N.N. *Raschet proektsii sily rezaniya* [Calculation of cutting force projections]. Moscow: Mashgiz, 1958. (In Russ.)
11. Reznikov N.I. *Uchenie o rezanii metallov* [Theory of metal cutting]. Moscow: Mashgiz, 1947. (In Russ.)

12. Klushin M.I. *Rezanie metallov* [Metal Cutting]. Moscow: Mashgiz, 1958, 454 p. (In Russ.)
13. Sharin Yu.S. *Issledovanie nekotorykh zakonomernostei protsessa rezaniya metallov pri izmenenii otnosheniya podachi k glubine rezaniya v shirokikh predelakh: avtoref. kand. tekhn. nauk* [Investigation of certain regularities of the metal cutting process with wide variation of the feed-to-cutting-depth ratio. Extended abstract of Ph.D. dissertation]. Sverdlovsk, 1953.
14. Kufarev G.L., Okenov K.B., Govorukhin V.A. *Struzhkoobrazovanie i kachestvo obrabotannoi poverkhnosti pri nesvobodnom rezanii* [Chip formation and machined quality in non-free cutting]. Frunze: Mektep, 1970, 170 p. (In Russ.)
15. Vereshchaka A.S., Kushner V.S. *Rezanie materialov: uchebnik* [Material cutting: textbook]. Moscow: Vysshaya Shkola, 2009, 535 p. (In Russ.)

Поступила 12.01.2026; принята к публикации 07.05.2026; опубликована 30.09.2026

Submitted 12/01/2025; revised 07/05/2026; published 30/09/2026

Воробьев Александр Алфеевич – доктор технических наук, профессор,
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
Санкт-Петербург, Россия.

Терентьев Алексей Вячеславович – доктор технических наук, доцент,
Государственный университет управления, Москва, Россия.

Покровская Оксана Дмитриевна – доктор технических наук, доцент,
Государственный университет управления, Москва, Россия.
Email: insight1986@inbox.ru. ORCID 0000-0001-9793-0666

Степанов Алексей Алексеевич – доктор экономических наук, профессор,
Государственный университет управления, Москва, Россия.

Загородний Николай Александрович – доктор технических наук, доцент,
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова, Белгород, Россия.

Alexander A. Vorobyov – DrSc (Eng.), Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russia.

Alexey V. Terentyev – DrSc (Eng.), Associate Professor,
State University of Management, Moscow, Russia.

Oksana D. Pokrovskaya – DrSc (Eng.), Associate Professor,
State University of Management, Moscow, Russia.
Email: insight1986@inbox.ru. ORCID 0000-0001-9793-0666

Alexey A. Stepanov – DrSc (Eng.), Professor,
State University of Management, Moscow, Russia.

Nikolay A. Zagorodny – DrSc (Eng.), Associate Professor,
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia.

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

УДК 658.5

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-73-81



ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИМЕНЬШЕГО ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРА ШЕРОХОВАТОСТИ НА ЧЕРТЕЖАХ ДЕТАЛЕЙ СРЕДИ ПОВЕРХНОСТЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ ТОЧЕНИЯ И ФРЕЗЕРОВАНИЯ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Кузнецов С.В., Роговик А.А.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В современном мире все большее распространение и внедрение в различных областях человеческой деятельности получают различные модели нейронных сетей, которые уже активно применяют в технических науках, в частности в машиностроении. В работе описан один из перспективных методов применения моделей нейронных сетей для классификации и обнаружения объектов на изображениях и видео для работы с чертежами деталей. В перспективе описанный метод позволит существенно сократить время подготовки технологической документации при запуске деталей в производство, так как модель сможет выполнять часть функций, ранее осуществляемых человеком. Основная цель работы – это получение метода, функционирующего в автоматизированном режиме, который можно будет применять для работы с чертежами деталей в электронном формате для решения задачи по определению наименьшего значения параметра шероховатости среди поверхностей детали, полученных методами точения и фрезерования. В ходе работы было использовано несколько основных методов и инструментов – это методы обучения моделей нейронных сетей, способных работать с изображениями и видео и решать задачи обнаружения и классификации объектов на них, методы использования данных моделей, методы создания программ для ЭВМ на языке программирования Python. В итоге по результатам работы был получен метод, реализованный при помощи программы для ЭВМ, который позволяет с высокой скоростью обрабатывать чертежи деталей и с высокой точностью определять минимальное значение параметра шероховатости с дальнейшим занесением полученных значений в таблицу. Разработанный метод имеет существенные перспективы практического применения в связи с возможностью его использования как части составного программного комплекса для автоматизированного подбора оборудования.

Ключевые слова: обнаружение объектов на изображениях, нейронные сети, распознавание объектов, компьютерное зрение, “YOLO”, токарная обработка, фрезерная обработка, подбор оборудования, шероховатость поверхности

© Кузнецов С.В., Роговик А.А., 2026

Для цитирования

Кузнецов С.В., Роговик А.А. Определение наименьшего значения параметра шероховатости на чертежах деталей среди поверхностей, полученных методами точения и фрезерования, с использованием моделей нейронных сетей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 73-81. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-73-81>



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

DETERMINATION OF THE MINIMUM SURFACE ROUGHNESS PARAMETER VALUE IN ENGINEERING DRAWINGS OF PARTS AMONG SURFACES PRODUCED BY TURNING AND MILLING USING NEURAL NETWORK MODELS

Kuznetsov S.V., Rogovik A.A.

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. In the modern world, various neural network models are becoming increasingly widespread and are being implemented in different areas of human activity. They are already actively used in technical sciences, particularly in mechanical engineering. This paper describes one of the promising methods for applying neural network models to image and video object classification and detection for processing engineering drawings of parts. In the future, the described method will make it possible to significantly reduce the time required to prepare technological documentation when launching parts into production, as the model will be able to perform some of the functions previously carried out by humans. The study is aimed at developing an automated method that can be applied to electronic engineering drawings of parts to determine the minimum surface roughness parameter among the surfaces produced by turning and milling operations. Several principal methods and tools have been used in the study, including methods for training neural network models capable of processing images and videos and solving object detection and classification tasks, methods for applying these models, and methods for developing computer programs in the Python programming language. As a result, a method implemented as a computer program has been developed. It enables engineering drawings of parts to be processed at high speed and the minimum surface roughness value to be determined with high accuracy, followed by recording the obtained values in a table. The developed method has significant potential for practical application due to the possibility of incorporating it into an integrated software system for automated equipment selection.

Keywords: object detection in images, neural networks, object recognition, computer vision, YOLO, turning, milling, equipment selection, surface roughness.

For citation

Kuznetsov S.V., Rogovik A.A. Determination of the Minimum Surface Roughness Parameter Value in Engineering Drawings of Parts Among Surfaces Produced by Turning and Milling Using Neural Network Models. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 73-81. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-73-81>

Введение

В наши дни все большее распространение получают различные методы, способствующие снижению участия человека при выполнении различных работ и процессов. Данная тенденция также отчетливо просматривается и в машиностроительной области, где с каждым годом разрабатывается все больше средств и методов, способствующих частичной или полной автоматизации производственных процессов и технологической подготовки производства.

Одним из таких методов, получившим повсеместное распространение и внедрение в последние годы, является создание и применение моделей с использованием нейронных сетей. Применение данных моделей во всех сферах человеческой жизнедеятельности способствует существенному повышению эффективности труда человека, а в некоторых случаях даже его практически полному исключению из производственного процесса.

Некоторые возможности применения моделей нейронных сетей в машиностроении уже описаны в ранее опубликованных работах [1-5]. На данный момент модели уже способны эффективно использо-

ваться человеком для выполнения таких машиностроительных задач, как:

- автоматизированный расчет режимов обработки различных материалов;
- решение различных инженерных задач при планировании и подготовке производства;
- управление производственными процессами на предприятиях с возможностью их выполнения в адаптивном режиме;
- мониторинг процесса обработки резанием различных материалов;
- выполнение работ по мониторингу работоспособности оборудования;
- прогнозирование вероятности и времени отказа оборудования.

В представленной работе был реализован один из возможных перспективных методов применения моделей нейронных сетей в машиностроительной области. Были созданы и применены модели для работы с изображениями и видео, а именно для классификации объектов на изображениях. Разработанный метод в перспективе сможет позволить значительно увеличить эффективность труда инженеров при подготовке про-

изводства на предприятиях, занимающихся изготовлением деталей методами обработки резанием.

Цель представленной работы – это разработка метода, который можно будет эффективно применять для работы с чертежами деталей в электронном формате и решения задачи по определению наименьшего значения параметра шероховатости среди поверхностей детали, полученных методами точения и фрезерования, в автоматизированном режиме с использованием моделей нейронных сетей.

При реализации данной цели были созданы две модели: первая – для обнаружения и выделения на чертежах областей, содержащих знаки шероховатости вне зависимости от её значения, и вторая – непосредственно классифицирующая выделенные области по конкретным значениям (например, “12.5”, “6.3”, “3.2”, “1.6” и т.д.). Такое решение было принято по причине того, что данный вариант показал наибольшую точность во время разработки. Далее была создана программа для ЭВМ, которая, используя последовательно эти две полученные модели, выполняет следующие функции: нахождение областей, содержащих знаки шероховатости и выделение их в рамки, вырезание знаков шероховатости по выделенным рамкам, классификация значения шероховатостей для получения конкретного значения из каждой выделенной рамки, корректировка полученных результатов классификации и исключение значений с низкой вероятностью достоверности ответа, выбор наименьшего значения из полученных на предыдущем этапе, занесение значения и номера чертежа в таблицу.

В ходе создания описанной программы было использовано несколько основных инструментов и методов:

- методы обучения моделей нейронных сетей, способных работать с изображениями и видео и решать задачи обнаружения и классификации объектов на них;
- методы использования данных моделей;
- методы создания программ для ЭВМ на языке программирования “Python”.

На первом этапе работы был проведён поиск и анализ имеющейся информации по использованию нейронных сетей, а именно по их обучению и работе с ними. Было рассмотрено несколько публикаций по данной тематике [6-8]. Особый интерес представляла работа с моделями, способными обрабатывать изображения и решать задачи по поиску и классификации объектов. Причиной этого является тот факт, что успех реализации поставленной задачи напрямую зависит от правильности выбора базовой модели, из имеющихся в открытом доступе.

Основными требованиями при выборе модели являлись высокая точность и скорость обработки, открытый исходный код, возможность обучения и работы со своим набором данных.

Было рассмотрено несколько различных моделей, которые отвечают данным требованиям: “SSD (Single Shot Detector)”, “YOLO (You Only Look

Once)”, “Mask R-CNN” и “Faster R-CNN”. После анализа имеющейся информации по данным моделям в качестве основного варианта была выбрана модель “YOLO”, так как данный алгоритм обеспечивает одну из самых высоких скоростей работы и точность обнаружения и классификации объектов. Данная модель активно применяется для решения задач обнаружения в различных областях. “YOLO” основана на архитектуре “DarkNet”, которая разрабатывалась для решения задач с применением компьютерного зрения. Преимущества работы с данной моделью ранее были представлены во многих публикациях [9-11].

Новизна описанной в статье работы обуславливается тем, что отсутствуют публикации, содержащие подобные изыскания, и нет описанных аналогов, способных выполнять возложенные на разработку функции.

Полученный метод имеет хорошие перспективы применения на практике, так как его можно использовать как составную часть метода для автоматизированного подбора оборудования для выполнения операций механической обработки вместе с другими частями разрабатываемого программного комплекса. Перспективы применения данного программного комплекса и некоторых его составляющих уже ранее были описаны и представлены [12, 13]. Основной эффект от внедрения разработанного метода – увеличение эффективности труда инженеров-технологов за счет его способности автоматизировать часть их работы по выбору необходимых металлорежущих станков.

Также описываемый в работе метод может быть использован при сортировке и группировании деталей, так как значение параметров шероховатости поверхности является одной из основных характеристик детали. Преимущества данного подхода при планировании производства были описаны ранее в работах [14, 15].

Таким образом, можно отметить, что данная статья может стать интересна специалистам в области машиностроения, представляющим предприятия, которые занимаются изготовлением деталей с использованием токарной и фрезерной обработки, таких как валы, корпуса, опоры, рычаги, оси, фланцы, втулки, диски и др.

Основные этапы проведения работы

Первый этап – создание наборов данных для машинного обучения моделей. Создание любой модели нейронной сети для классификации и обнаружения объектов начинается именно с этого шага. Данный этап является одним из самых основных в достижении поставленной задачи, так как от качества собранных данных напрямую будет зависеть качество полученных моделей.

Для обучения необходимых для работы моделей было собрано 2000 изображений в формате “JPEG” различных чертежей или их фрагментов, оформленных согласно требованиям «Единой системы конструкторской документации». Данный набор был со-

бран так, чтобы он включал в себя достаточное для обучения разнообразие данных, с которыми впоследствии предстоит работать моделям: чертежи различных форматов листа (A4, A3, A2, A1) и изображения различного качества и разрешения.

Далее необходимо выбрать, какие классы будут обучаться распознавать создаваемую модель. В качестве параметра, определяющего классы, была выбрана шероховатость Ra – среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины, так как данный параметр является предпочтительным согласно ГОСТ Р 70117–2022. Используемые значения данного параметра были взяты согласно ГОСТ 2789–73 из таблицы 2. После этого был выбран рабочий диапазон значений. Начальным значением диапазона было выбрано $Ra_{12,5}$, так как это значение, для получения которого однозначно необходимо применение механической обработки, в том числе токарными и фрезерными методами. Конечным значением диапазона выбрано значение $Ra_{0,4}$, так как на данный момент это наилучший показатель, который можно получить при обработке на токарных и фрезерных станках твердосплавным инструментом в идеальных условиях. Таким образом, имеем рабочий диапазон $Ra_{12,5} - Ra_{0,4}$, который разграничен красной линией на рис. 1. Далее из этого диапазона были выбраны те значения, которые являются предпочтительными согласно ГОСТ 2789–73. После анализа подготовленного набора чертежей бы-

ло получено, что также большое распространение имеют значения $Ra_{2,5}$ и $Ra_{1,25}$, поэтому их также было решено добавить к обучению моделей.

Таким образом, были приняты классы для обучения модели, а именно значения Ra : 12,5; 6,3; 3,2; 2,5; 1,6; 1,25; 0,8; 0,4, которые выделены желтым цветом на рис. 1.

После того как были определены классы для обучения, были созданы два набора данных для двух моделей: первой – для обнаружения и выделения на чертежах областей, содержащих знаки шероховатости вне зависимости от их значений, и второй – для непосредственной классификации выделенных областей по конкретным значениям.

Набор данных для обучения первой модели был создан из подготовленных ранее 2000 изображений чертежей в формате “JPEG”, с которым работает модель “YOLO”, который далее был разделен на две части: тренировочную и проверочную. Тренировочная часть составила 1600 изображений (80%), проверочная – остальные 400 изображений (20%). Далее для всех этих изображений была выполнена «разметка» (подготовка текстовых файлов с координатами искомого объектов на изображении), суть которой состояла в выделении всех возможных знаков шероховатости на чертежах. Пример того, как это было выполнено на одном из изображений из обучающего набора, представлен на рис. 2.

ГОСТ 2789–73 С. 3

8.1. Среднеарифметическое отклонение профиля Ra

Таблица 2

МКМ				
100	10,0	1,00	0,100	0,010
80	8,0	0,80	0,080	0,008
63	6,3	0,63	0,063	—
50	5,0	0,50	0,050	—
40	4,0	0,40	0,040	—
32	3,2	0,32	0,032	—
25	2,5	0,25	0,025	—
20	2,0	0,20	0,020	—
16,0	1,60	0,160	0,016	—
12,5	1,25	0,125	0,012	—

Примечание. Предпочтительные значения параметров подчеркнуты.

Рис. 1. Выбор значения классов для обучения модели из значений по ГОСТ 2789–73

Fig. 1. Selection of class values for model training based on the values specified in GOST 2789–73

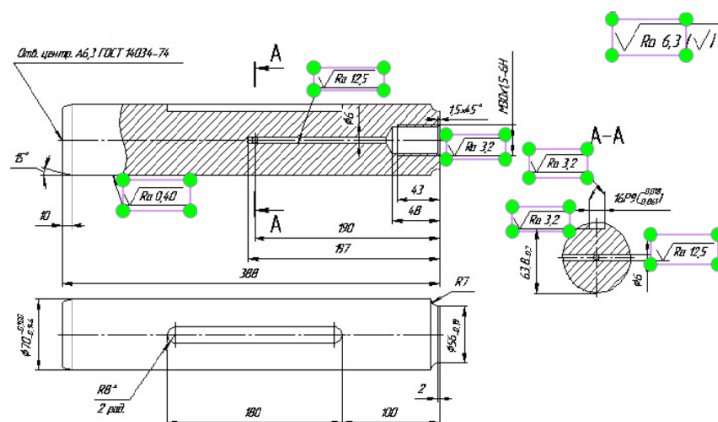


Рис. 2. Пример размеченного изображения из обучающего набора данных

Fig. 2. Example of an annotated image from the training dataset

После подготовки обучающего набора для модели для обнаружения объектов на изображении был подготовлен набор данных для обучения модели для классификации объектов. Подготовка данного “DataSet” для такой модели не требует разметки и она состоит в том, чтобы распределить классифицируемые объекты по папкам. Для этого было подготовлено 2000 изображений тех знаков шероховатости, которые были определены ранее, с дальнейшим разделением их на два набора: тренировочный и проверочный в соотношении 85 и 15%. В итоге имеем 8 папок в каждом наборе: 12,5; 6,3; 3,2; 2,5; 1,6; 1,25; 0,8; 0,4. Кроме того, необходимо отметить, что все изображения были получены обрезкой по координатам с тех чертежей, которые были использованы для обучения первой модели. Пример изображений из обучающего набора данных для модели для классификации представлен на рис. 3.

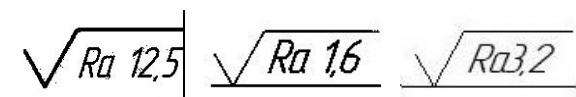


Рис. 3. Примеры изображений из набора данных для обучения модели для классификации
Fig. 3. Examples of images from the dataset used to train the classification model

Второй этап – обучение двух необходимых моделей. Первой была обучена модель для обнаружения знаков шероховатости на чертежах. Как было сказано ранее, в качестве базовой модели были взята модель “YOLO”, которая уже предварительно обучена распознавать некоторые типы объектов на изображениях и видео и которая была переобучена для выполнения поиска необходимых нам объектов на наборе данных,

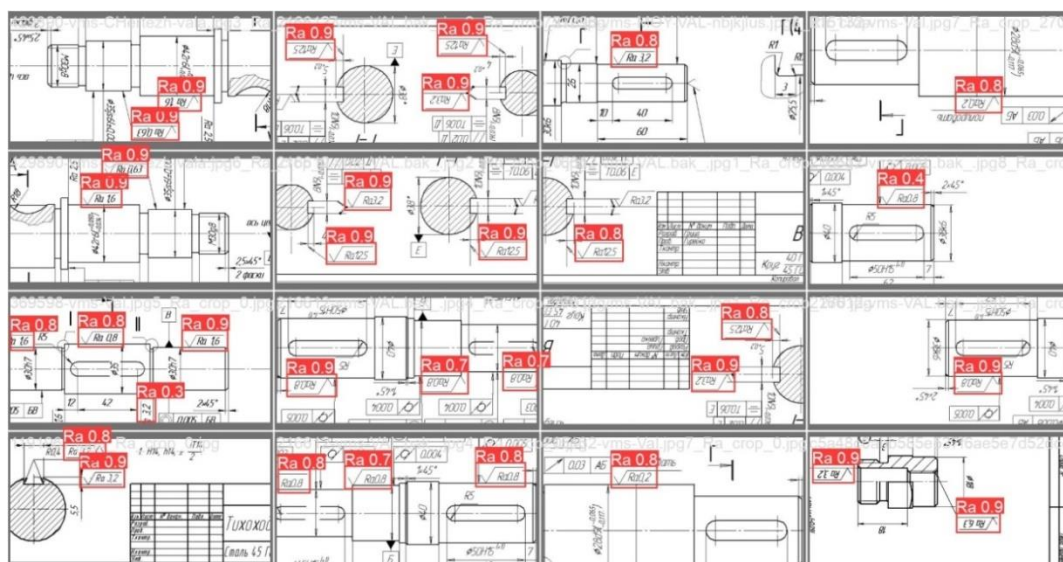
описанном на предыдущем этапе. Исходные данные для обучения модели имели следующие значения:

- приводимое разрешение изображений по большей стороне – 1280;
- количество шагов – 16;
- количество эпох обучения – 30.

Пример того, как модель во время обучения выделяла знаки шероховатости на изображениях из проверочного набора, представлен на рис. 4. Данный пример был получен в результате обработки моделью набора данных на эпохе с наибольшей полученной точностью. На рис. 4 видно, что модель смогла найти и выделить в рамки все имеющиеся знаки шероховатости на представленных изображениях.

В итоге после обучения была получена модель объемом 13,9 МБ, взятая с одной из тридцати эпох обучения с наибольшей точностью, со следующими характеристиками, которые используют для оценки качества подобных моделей:

- “P” (точность модели, показывающая долю правильных ответов из всех, которые предоставила модель) – 0,926;
- “R” (полнота охвата моделью, показывает долю найденных объектов из тех, которые были на изображениях) – 0,931;
- “mAP50” (среднее значение средней точности AP, рассчитываемой из показателей P и R, по всем классам при перекрытии размеченной рамки и рамки определенной модели 50%) – 0,967;
- “mAP50-95” (среднее арифметическое значений средней точности AP по всем классам, рассчитываемое при различном проценте перекрытия от 50 до 95%) – 0,612.



Приемлемые значения данных показателей, которые определены как приемлемые разработчиками базовой модели для большинства случаев, составляют: “P” – 0,7; “R” – 0,7; “mAP50” – 0,6, “mAP50-95” – 0,5. Полученные значения являются весьма высокими и превышают уровень, считающийся приемлемым.

На графиках, представленных на **рис. 5**, можно видеть, как изменялись данные четыре показателя в течение тридцати эпох обучения.

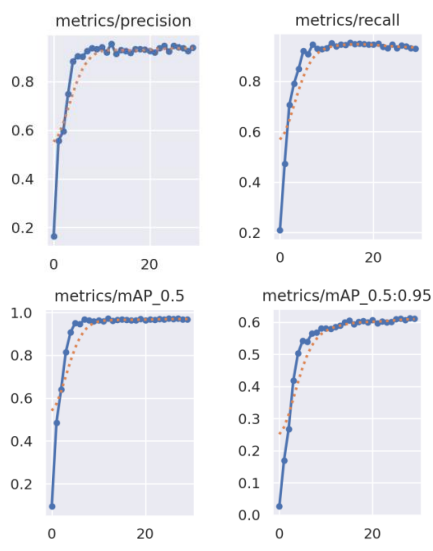


Рис. 5. Графики изменения показателей P, R, mAP50, mAP50-95 во время тридцати эпох обучения
Fig. 5. Graphs of changes in indicators P, R, mAP50, mAP50-95 during thirty training epochs

После обучения был проведен тест полученной модели на случайных изображениях чертежей в количестве 35 шт. На 34-х из 35-ти изображений модель не допустила ни одной ошибки. На одном изображении модель дополнительно выделила области, не содержащие знаки шероховатости.

Далее была обучена вторая модель для классификации знаков шероховатости по 8-ми классам: 12,5; 6,3; 3,2; 2,5; 1,6; 1,25; 0,8; 0,4. За базу также была принята предварительно обученная модель “YOLO”. Исходные данные для обучения модели:

- приводимое разрешение изображений по большей стороне – 224 (низкое значение, так как изображения из набора данных имеют низкое разрешение);

- количество шагов – 32;

- количество эпох обучения – 100.

Для оценки модели для классификации объектов основным является показатель “top1_acc”, который показывает долю правильных ответов среди ответов с самой высокой вероятностью для изображений из проверочной части обучающего набора. В итоге имеем значение 0,972 для всех классов, на эпохе с наивысшей точностью. То есть модель правильно определила 97% изображений, что является очень

высоким показателем. График изменения данного показателя в течение 100 эпох обучения представлен на **рис. 6**.

После обучения для полученной модели был проведен тест на 50-ти изображениях различных шероховатостей. В результате было правильно определено значение шероховатости на 48-ми изображениях из тестового набора.

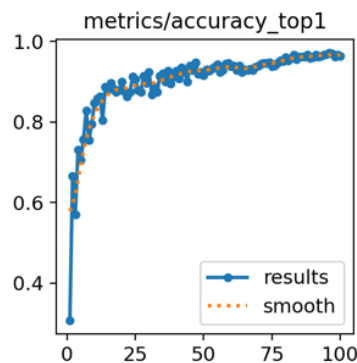


Рис. 6. График изменения показателя “top1_acc” во время ста эпох обучения

Fig. 6. Graph of changes in the “top1_acc” indicator during one hundred training epochs

Таким образом, были получены две модели нейронных сетей для работы с изображениями, в нашем случае с чертежами, которые были испытаны на случайных изображениях и показали очень высокие показатели точности. Исходя из этого, было принято решение о возможности их применения для дальнейшей работы и использования в разрабатываемой программе для ЭВМ.

Третий этап – создание программы для ЭВМ.

После получения двух работоспособных моделей с удовлетворяющими нас показателями точности была разработана программа для ЭВМ, которая при помощи этих двух моделей может определять значение параметра наименьшей шероховатости поверхностей, полученных методами точения и фрезерования, на чертежах деталей в автоматизированном режиме. Данная программа была написана на языке программирования “Python”, так как используемая версия модели “YOLO” работает с кодом, написанным на данном языке. Основные функции полученной программы:

- при помощи первой модели для обнаружения объектов находить на чертежах области, содержащие знаки шероховатости и выделять их в рамки;

- вырезать с чертежей найденные знаки шероховатости по выделенным рамкам;

- при помощи второй модели классифицировать значения шероховатостей для получения конкретного значения из каждой выделенной первой моделью рамки;

- корректировать полученные результаты классификации и исключать значения с низкой вероятностью достоверности ответа;

– выбирать наименьшее значение из тех, которые были получены после обработки второй модели на предыдущем этапе;

– заносить полученные значения и номера чертежа в таблицу в редактируемом формате.

Все указанные функции программа выполняет автоматически, от пользователя необходима лишь корректировка значений в случае обнаружения ошибок.

После того как разработка была завершена, был проведен тест полученной программы, который был проведен на тестовом наборе данных, состоящем из 35-ти случайных изображений чертежей деталей. В результате, разработанная программа смогла успешно выполнить все перечисленные ранее функции. Правильно было определено 34 из 35-ти значения параметра минимальной шероховатости для деталей. Кроме того, все полученные значения были занесены в таблицу в редактируемом формате. Среднее время обработки одного изображения составило примерно 5 с. На рис. 7 в качестве примера представлен один чертеж из тестового набора, который был успешно обработан, и результат был выведен пользователю.

Исходя из вышесказанного, можно утверждать, что разработанная программа смогла выполнить возлагаемые на неё функции, определить подавляющее большинство искомых значений и вывести их пользователю в виде документа в редактируемом формате.

Заключение

Обе разработанные модели на основе нейронной сети для обнаружения объектов на изображениях и видео “YOLO” показали высокие показатели качества

после их обучения и тестирования. Первая модель для обнаружения знаков шероховатости на чертежах смогла показать хорошие результаты, что можно подтвердить значениями характеристик точности моделей для обнаружения объектов “P, R, mAP50, mAP50-95”, которые оказались значительно выше рекомендуемых разработчиками базовой модели для большинства случаев как приемлемые. Также работоспособность данной модели была подтверждена результатами проведенного тестирования на 35-ти случайных изображениях чертежей деталей, по результатам которого модель смогла обработать без ошибок 34 изображения из 35-ти. На одном изображении также были правильно выделены все области, содержащие значения шероховатости, но на нем были выделены и области, которые её не содержат.

Вторая модель для классификации знаков шероховатости по восьми видам (12,5; 6,3; 3,2; 2,5; 1,6; 1,25; 0,8; 0,4) также показала весьма высокий результат. Основным показателем точности для таких моделей, показывающий долю правильных ответов, составил 0,972, то есть 97% правильных ответов, полученных во время обучения модели на эпохе с самой высокой точностью. По результатам теста также был получен хороший результат – модель смогла правильно определить 48 из 50-ти объектов на тестовых изображениях правильно. Исходя из этого, можно сказать, что полученные модели показали высокую эффективность при обнаружении и классификации знаков шероховатости при обнаружении их на чертежах деталей в формате изображения “JPEG”.

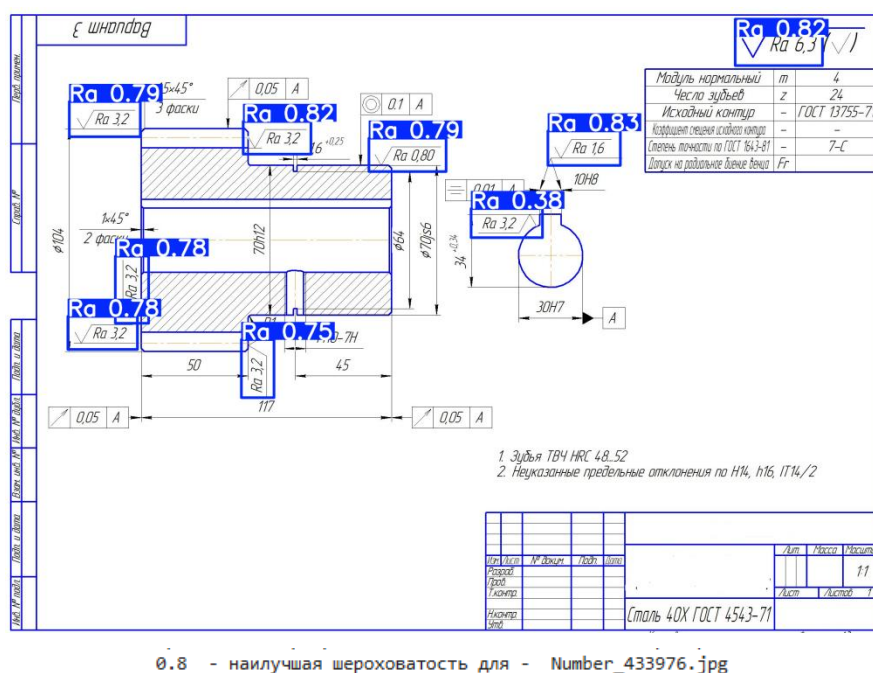


Рис. 7. Пример одного из обработанных чертежей во время тестирования

Fig. 7. Example of an engineering drawing processed during testing

Разработанная программа для ЭВМ, использующая разработанные модели, также показала весьма высокие результаты своей работы. По результатам проведенного теста программа смогла правильно обработать 34 из 35-ти случайных изображений чертежей деталей и вывести пользователю их минимальные значения параметра шероховатости поверхностей, полученных методами точения и фрезерования. Программа выполнила все описанные ранее функции и смогла создать таблицу в редактируемом формате, содержащую названия чертежей и полученные значения шероховатости в автоматическом режиме. Среднее время обработки одного изображения составило примерно 5 с.

Полученные в ходе работы результаты имеют значительные перспективы для их применения в практической деятельности, так как обе разработанные модели и программа для ЭВМ могут быть использованы как составная часть метода для автоматизированного подбора оборудования для выполнения операции механической обработки вместе с другими частями разрабатываемого программного комплекса. Это, в свою очередь, может способствовать частичной автоматизации работы технологов при выполнении подбора металлорежущего оборудования, а именно токарных и фрезерных станков. Также полученные результаты могут быть использованы для сортировки и группирования деталей.

Подводя итоги, можно сказать, что разработанная программа для ЭВМ имеет хорошие перспективы её применения и может быть интересна представителям предприятий единичного и серийного производства, которые имеют большую производственную номенклатуру и занимаются изготовлением деталей на токарных и фрезерных станках.

Список источников

1. Сверточные нейронные сети для выявления дефектов и повреждений конструкций / Степанов Д.В., Макаров А.В., Молотов А.М., Облетов Е.Н. // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 9. С. 52-58.
2. Алтунина К.А., Соколова М.В. Применение нейронных сетей для моделирования процесса токарной обработки // Вестник ТГТУ. 2016. Т. 22. № 1. С. 122-133.
3. Суздалева Н.Н. Потенциал использования нейросетей промышленными предприятиями в условиях российской действительности // Региональная и отраслевая экономика. 2022. №11 (173). С. 91-94.
4. Веретельников А. С., Гавлицкий А. И. Применение искусственного интеллекта в металлообрабатывающей промышленности // Электронный научный журнал «Дневник науки». 2022. №12.
5. Алханов А.А. Машинное обучение и его применение в современном мире // Проблемы науки. 2021. №7 (66). С. 25-27.
6. Redmon J., Farhadi A. YOLO9000: Better, Faster, Stronger // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2017, pp. 7263–7271.

7. Redmon J., Shooji F., Farhadi A. YOLOv5 Training and Improving Object Detectors and Segmentation Models with One Click. // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2022, pp. 962–972.
8. Lin T.-Y., Dollár P., Girshick R., He, K., Hariharan, B., Belongie, S. Feature Pyramid Networks for Object Detection. // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2017, pp. 936–944.
9. Кузнецов С.В., Роговик А.А., Кузнецова Е.С. Детекция деталей, получаемых методами токарной обработки, с использованием модели для распознавания объектов YOLOv5 // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 122-128. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-122-128>
10. Bochkovskiy A., Wang, C. YOLOv5: Creating State-of-the-Art Object Detectors in Real Time. [S. l.] // ArXiv, 2021, pp. 214–219.
11. Bochkovskiy A. YOLOv7: Trainable Boosted Data-Driven Layer for Real-Time Object Detection. [S. l.] // ArXiv, 2023, pp. 5147–5155.
12. Кузнецов С.В., Роговик А.А. Определение максимального диаметра деталей типа тел вращения на чертежах в автоматизированном режиме // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2025. Т. 28, № 4. С. 29–35. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-4-29-35
13. Кузнецов С.В., Роговик А.А. Автоматизированное нахождение и распознавание длин деталей типа тела вращения на чертежах с использованием инструментов компьютерного зрения // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 133-141. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-133-141>
14. Митрофанов С.П. Научная организация машиностроительного производства. Л.: Машиностроение, 1976. 712 с.
15. Кузнецов С. В., Роговик А.А. Группирование деталей тел вращения типа диск и ему подобных при планировании их изготовления с целью увеличения серийности производства // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2025. Т. 28, № 1. С. 24–32. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-1-24-32.

References

1. Stepanov D.V., Makarov A.V., Molotov A.M., Obletov E.N. Convolutional neural networks for detecting defects and damage in structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2024;(9):52-58. (In Russ.)
2. Altunina K.A., Sokolova M.V. Application of neural networks for modeling the turning process. *Vestnik TGTU* [Vestnik of TSTU]. 2016;22(1):122-133. (In Russ.)
3. Suzdaleva N.N. Potential for the use of neural networks by industrial enterprises under Russian conditions. *Regionalnaya i otraslevaya ekonomika* [Regional and sectoral economics]. 2022;(11(173)):91-94. (In Russ.)
4. Veretelnikov A.S., Gavlit'skiy A.I. Application of artificial intelligence in the metalworking industry. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Dnevnik nauki»* [Electronic scientific journal "Diary of Science"]. 2022;(12). (In Russ.)

5. Alkhanov A.A. Machine learning and its application in the modern world. *Problemy nauki* [Problems of science]. 2021;(7(66)):25-27. (In Russ.)
6. Redmon J., Farhadi A. YOLO9000: Better, Faster, Stronger. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017, pp. 7263-7271.
7. Redmon J., Shooji F., Farhadi A. YOLOv5 Training and Improving Object Detectors and Segmentation Models with One Click. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2022, pp. 962-972.
8. Lin T.-Y., Dollár P., Girshick R., He K., Hariharan B., Belongie S. Feature Pyramid Networks for Object Detection. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017, pp. 936-944.
9. Kuznetsov S.V., Rogovik A.A., Kuznetsova E.S. Detection of parts produced by turning using the YOLOv5 object recognition model. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025;23(3):122-128. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-122-128.
10. Bochkovskiy A., Wang C. YOLOv5: Creating State-of-the-Art Object Detectors in Real Time. [S. l.]. ArXiv. 2021;214-219.
11. Bochkovskiy A. YOLOv7: Trainable Boosted Data-Driven Layer for Real-Time Object Detection. [S. l.]. ArXiv. 2023;5147-5155.
12. Kuznetsov S.V., Rogovik A.A. Automated determination of the maximum diameter of rotational parts in engineering drawings. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova* [Bulletin of Kalashnikov Izhevsk State Technical University]. 2025;28(4):29-35. (In Russ.) DOI: 10.22213/2413-1172-2025-4-29-35.
13. Kuznetsov S.V., Rogovik A.A. Automated detection and recognition of the lengths of rotational parts in engineering drawings using computer vision tools. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026;24(1):133-141. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-1-133-141.
14. Mitrofanov S.P. *Nauchnaya organizatsiya mashinostroitel'nogo proizvodstva* [Scientific organization of machine-building production]. Leningrad: Mashinostroenie, 1976, 712 p. (In Russ.)
15. Kuznetsov S.V., Rogovik A.A. Grouping of disk-type rotational parts and similar parts when planning their manufacture in order to increase production series. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova* [Bulletin of Kalashnikov Izhevsk State Technical University]. 2025;28(1):24-32. (In Russ.) DOI: 10.22213/2413-1172-2025-1-24-32.

Поступила 29.01.2026; принята к публикации 20.02.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 29/01/2026; revised 20/02/2026; published 30/09/2026

Кузнецов Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Машиностроительные технологические комплексы»,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: ks251072@yandex.ru. ORCID 0009-0004-9532-1671

Роговик Артем Алексеевич – аспирант,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: artem-rogovik@mail.ru. ORCID 0009-0004-4099-7324

Sergey V. Kuznetsov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Machine-Building Technological Complexes,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: ks251072@yandex.ru . ORCID 0009-0004-9532-1671

Artem A. Rogovik – Postgraduate Student,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: artem-rogovik@mail.ru . ORCID 0009-0004-4099-7324

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS

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

УДК 669.14.018.95:519.237.8:004.932

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-82-92



МЕТОДЫ РАСЧЕТА ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ПО ЦИФРОВОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ МИКРОСТРУКТУРЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ МЕТАЛЛОГРАФИИ

Башков А.А.¹, Аносов М.С.¹, Иванов С.В.¹, Баженов Е.О.¹, Акулова А.А.¹, Чичеватов А.В.²

¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

²Филиал ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седякова», Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В современной количественной металлографии актуальной задачей является разработка объективных методов оценки сложности и морфологии микроструктуры металлических материалов на основе анализа цифровых изображений. Традиционные методы визуального анализа во многом зависят от субъективной интерпретации исследователя, что ограничивает воспроизводимость результатов. В связи с этим перспективным направлением является применение методов фрактального анализа, позволяющих описывать геометрическую сложность микроструктурных элементов с использованием количественных параметров. Целью работы является исследование возможностей использования фрактальной размерности для количественной характеристики микроструктуры различных марок сталей по цифровым микрофотографиям. Объектами исследования являлись стали 20Х13, У10А, 50 и 12Х18Н10Т. Для обработки изображений и расчёта фрактальной размерности применялись методы фрактального анализа, включая дифференциальный метод подсчёта ячеек, реализованный в разработанном программном обеспечении (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU №2024660065), а также классический алгоритм box-counting, реализованный в среде MATLAB R2021b. Научная новизна работы заключается в сравнительном применении различных алгоритмов расчёта фрактальной размерности к цифровым изображениям микроструктур сталей и в интерпретации полученных значений с позиции физики металлов. Показано, что значения фрактальной размерности отражают особенности морфологии микроструктурных элементов — границ зёрен, карбидных выделений и мартенситных структур. Полученные результаты демонстрируют возможность использования фрактального анализа для перехода от качественного описания микроструктуры к количественным параметрам. Практическая значимость работы заключается в перспективе применения предложенных подходов при автоматизации металлографического анализа, контроле качества материалов и исследовании взаимосвязи «структура–свойства».

Ключевые слова: фрактальная размерность, микроструктура стали, цифровая металлография, дифференциальный метод подсчёта ячеек, количественный анализ изображений, материаловедение, физика металлов

Статья подготовлена в рамках реализации гранта №25-19-00534 от 29.05.2025 г.

© Башков А.А., Аносов М.С., Иванов С.В., Баженов Е.О., Акулова А.А., Чичеватов А.В., 2026

Для цитирования

Методы расчета фрактальной размерности по цифровому изображению микроструктуры для проведения количественной металлографии / Башков А.А., Аносов М.С., Иванов С.В., Баженов Е.О., Акулова А.А., Чичеватов А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 82-92. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-82-92>



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

METHODS FOR CALCULATING FRACTAL DIMENSION FROM DIGITAL MICROSTRUCTURE IMAGES FOR QUANTITATIVE METALLOGRAPHY

Bashkov A.A.¹, Anosov M.S.¹, Ivanov S.V.¹, Bazhenov E.O.¹, Akulova A.A.¹, Chichevatov A.V.²

¹Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

²Y.E. Sedakov Research Institute of Measuring Systems, a branch of the Russian Federal Nuclear Center, All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. In modern quantitative metallography, the development of objective methods for assessing the complexity and morphology of the microstructure of metallic materials based on digital image analysis is an important task. Traditional methods of visual analysis largely depend on the subjective interpretation of the researcher, which limits the reproducibility of the results. In this regard, the application of fractal analysis methods is a promising approach, as they make it possible to describe the geometric complexity of microstructural elements using quantitative parameters. The aim of this study is to investigate the potential of fractal dimension for the quantitative characterization of the microstructure of various steel grades using digital micrographs. The materials investigated are steels 20Kh13, U10A, 50, and 12Kh18N10T. Image processing and fractal dimension calculations have been performed using fractal analysis methods, including the differential box-counting method implemented in the developed software (Computer Program Registration Certificate No. RU 2024660065), as well as the classical box-counting algorithm implemented in MATLAB R2021b. The scientific novelty of the study lies in the comparative application of different algorithms for calculating fractal dimension to digital images of steel microstructures and in the interpretation of the obtained values from the perspective of the physics of metals. It has been shown that the fractal dimension values reflect the morphological features of microstructural elements, including grain boundaries, carbide precipitates, and martensitic structures. The results demonstrate the feasibility of using fractal analysis to move from qualitative descriptions of microstructure to quantitative parameters. The practical significance of the study lies in the potential application of the proposed approaches to the automation of metallographic analysis, quality control of materials, and investigation of structure-property relationships.

Keywords: fractal dimension, steel microstructure, digital metallography, differential box-counting method, quantitative image analysis, metals science, physics of metals.

The article was prepared within the framework of Grant No. 25-19-00534 dated May 29, 2025.

For citation

Bashkov A.A., Anosov M.S., Ivanov S.V., Bazhenov E.O., Akulova A.A., Chichevatov A.V. Methods for Calculating Fractal Dimension from Digital Microstructure Images for Quantitative Metallography. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 82-92. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-82-92>

Введение

Исторически металлография развивалась как дисциплина, сочетающая качественные и количественные методы анализа микроструктуры, включая стереометрические подходы и стандартизованные методы оценки, регламентированные ГОСТ, ISO, DIN, ASTM и др. В современном материаловедении, где требуется точное предсказание свойств материала, оптимизация технологических процессов и автоматизация контроля качества, возникает насущная потребность в переходе к полностью количественным методам анализа. Эта потребность обусловлена тем, что именно сложная геометрия и пространственное распределение микроструктурных элементов, таких как границы зерен, фазовые границы, поры, трещины и частицы выделений, в решающей степени определяют механические свойства материала, включая прочность, твердость, пластичность, ударную вязкость и коррозионную стойкость [1, 2]. Традиционные подходы, основанные на визуальном анализе с помощью микроскопии, позволяют классифициро-

вать структуры по морфологии фаз (например, зернистая, пластинчатая, игольчатая) и характеру их распределения [3, 4]. Однако такой подход, несмотря на свою ценность, имеет существенные ограничения. Он часто является субъективным, зависящим от опыта и квалификации исследователя, и не позволяет получить объективный, численный параметр для сравнительного анализа.

В этом контексте теория фракталов предлагает мощный инструмент для решения задачи количественной оценки сложных, нерегулярных и самоподобных структур, которые являются характерными чертами многих материалов, в том числе и металлов. В отличие от евклидовой геометрии, описывающей идеализированные формы, фрактальная геометрия способна характеризовать реальные объекты с любой степенью сложности. Центральным понятием здесь является фрактальная размерность D_f , характеризующая степень заполнения объектом пространства и определяемая скоростью роста числа элементов покрытия объекта, при уменьшении масштаба наблюдения. Важно отметить, что фрактальная размерность

не обязательно является целым числом; значение между N и $N+1$ размерностями указывает на то, что объект обладает сложностью, превышающей обычную геометрическую фигуру в N измерениях. Например, фрактальная размерность линии может быть больше 1, если она извивается и заполняет часть плоскости, и меньше 2, если она не покрывает всю плоскость. Именно эта возможность измерить сложность геометрии делает Df чрезвычайно ценным параметром для материаловедения.

Применение фрактального анализа в материаловедении и металлографии носит системный характер и направлено на преодоление ключевых проблем традиционных методов. Во-первых, это автоматизация и стандартизация анализа. Вместо ручной оценки можно разработать программные комплексы, которые за секунды рассчитывают Df для десятков или сотен изображений, обеспечивая полную объективность и воспроизводимость результатов [5]. Это особенно важно при контроле качества в промышленных условиях. Во-вторых, фрактальный анализ позволяет установить количественные связи между микроструктурой и макроскопическими свойствами, формируя более точные модели «структура-свойства». Исследования показывают, что существует сильная корреляция между фрактальной размерностью и такими параметрами, как твердость, предел текучести и усталостная прочность [2, 6, 7]. Например, было установлено, что увеличение Df микроструктуры может быть связано с ростом прочности из-за большей площади фазовых границ, которые препятствуют движению дислокаций. В-третьих, метод открывает возможности для создания автоматизированных систем классификации микроструктур. Путем обучения машинных моделей на наборах изображений с известными значениями Df и соответствующими им свойствами можно создавать системы, способные самостоятельно определять принадлежность нового образца к тому или иному классу (например, по степени термообработки или качеству сварного шва) [4, 8].

Практическое применение фрактального анализа охватывает широкий спектр задач в материаловедении. Одним из наиболее распространенных направлений является количественная фрактография – анализ поверхностей разрушения. Геометрия трещины и поверхности излома часто имеет фрактальные свойства, и их фрактальная размерность напрямую связана с механизмом хрупкого разрушения и энергией трещиностойкости [9, 10]. Другое важное направление – анализ пористости и распределения пор в материалах, где Df используется для количественной характеристики структуры пор [11, 12]. В области коррозии фрактальный анализ применяется для оценки сложности поверхности и распределения границ зерен, поскольку именно они являются предпочтительными путями для развития межкристаллитной коррозии [13, 14]. Было показано, что увеличение доли высокоугловых границ зерен и двойников может быть связано со снижением общей фрактальной размерности поверхности [14].

Для рассматриваемых в данном исследовании марок сталей фрактальный анализ может дать уникальные и глубокие сведения об их микроструктуре, которые труднодостижимы другими методами. Сталь У10А является углеродистой инструментальной сталью и ее основная структурная составляющая в равновесном состоянии – пластинчатый перлит (смесь феррита и цементита) с вторичным цементитом в виде тонкой сетки. Морфология и распределение вторичного цементита имеет решающее значение для износостойкости и прочности стали. Часто карбиды образуют сетку по границам зерен, которая является таким концентратором напряжений и очагом зарождения трещин. Фрактальная размерность этой карбидной сети может служить объективным индексом ее развития и «замкнутости», который коррелирует с усталостной прочностью [15]. Для конструкционной углеродистой стали 50 ключевыми факторами являются форма и распределение ферритных зерен и пластин перлита. Фрактальная размерность границ ферритных зерен может характеризовать степень их извилистости, которая влияет на работу упрочнения материала при пластической деформации [16, 17].

Для нержавеющей стали, таких как 20Х13 и 12Х18Н10Т, особое внимание уделяется границам зерен и их роли в формировании коррозионной стойкости. Аустенитная сталь 12Х18Н10Т, благодаря своему составу, обладает хорошей стойкостью, однако наличие крупных зерен или неоднородное распределение легирующих элементов может привести к локализованной коррозии. Фрактальный анализ границ зерен позволяет количественно оценить эту неоднородность [13, 14]. Таким образом, данное исследование направлено на демонстрацию практической применимости фрактальной размерности для количественной оценки и сравнительного анализа микроструктур четырех различных сталей, каждая из которых представляет интерес с точки зрения материаловедения.

Материалы и методы исследования

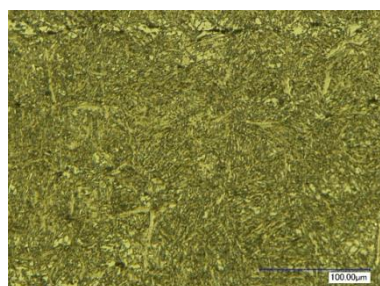
В качестве исходных материалов были выбраны металлы с различным содержанием углерода и легирующих элементов, представляющих различные классы по назначению и имеющих различную структуру. Химический состав сталей приведен в табл. 1, исходная микроструктура представлена на рис. 1.

Эффективность фрактального анализа микроструктур напрямую зависит от выбора адекватного алгоритма для расчёта фрактальной размерности и качества его реализации. В настоящей работе применяются два взаимодополняющих подхода: дифференциальный метод подсчёта ячеек (реализованный в авторском программном обеспечении) и классический метод подсчёта клеток (box-counting), реализованный в среде MATLAB. Такой подход позволяет не только повысить достоверность получаемых результатов за счёт кросс-валидации, но и продемонстрировать различия в чувствительности методов к типу изображения.

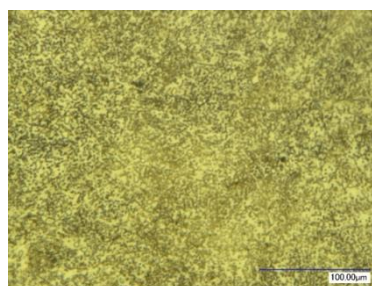
Таблица 1. Химический состав исследуемых материалов
Table 1. Chemical composition of the materials investigated

Материал	Массовая доля элементов, %									
	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As	Ti
20X13	0,17–0,24	0,17–0,37	0,35–0,65	до 0,3	до 0,04	до 0,035	12–14	до 0,3	до 0,08	–
У10А	0,95–1,09	0,17–0,33	0,17–0,28	до 0,25	до 0,018	до 0,025	до 0,2	до 0,25	–	–
50	0,47–0,55	0,17–0,37	0,5–0,8	до 0,3	до 0,04	до 0,035	до 0,25	до 0,3	до 0,08	–
12X18Н10Т	до 0,12	до 0,8	до 2	9–11	до 0,02	до 0,035	17–19	до 0,3	–	0,4–1

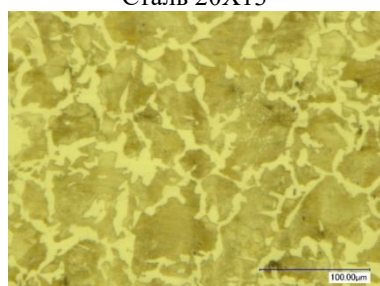
Примечание: 1. Сталь 20X13 (коррозионно-стойкая сталь мартенситного класса): исходное состояние – закалка (1000°C, охлаждение в масле), тип структуры – мартенситная.
2. Сталь У10А (инструментальная углеродистая): исходное состояние – отжиг (750–760°C, охлаждение с печью), тип структуры – мелкопластинчатый перлит с участками вторичного цементита.
3. Сталь 50 (конструкционная среднеуглеродистая): исходное состояние – нормализация (850°C, охлаждение на воздухе), тип структуры – ферритно-перлитная.
4. Сталь 12X18Н10Т (коррозионно-стойкая аустенитная сталь): исходное состояние – горячая деформация с последующим стабилизирующим отжигом при 1050–1100°C, тип структуры – аустенитная.



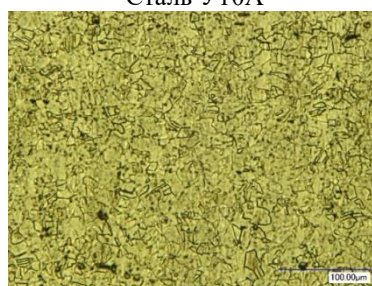
Сталь 20X13



Сталь У10А



Сталь 50



Сталь 12X18Н10Т

Рис. 1. Исходные микроструктуры исследуемых материалов (×1000)
Fig. 1. Initial microstructures of the materials investigated (×1000)

Дифференциальный метод подсчёта ячеек (авторское ПО). Программа разработана на языке Python с использованием библиотек OpenCV, NumPy и Tkinter и реализует дифференциальный метод подсчёта ячеек (box-counting) с адаптивной предобработкой изображений. Программа предоставляет пользователю графический интерфейс для загрузки цифрового изображения микроструктуры, настройки параметров анализа и визуализации результатов. Ключевые функциональные блоки:

- Загрузка изображения: поддержка форматов JPEG, PNG через диалоговое окно.
- Предварительная обработка:
 - преобразование в цветовое пространство LAB с последующим применением CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization) для улучшения контрастности;
 - применение *unsharp masking* для повышения чёткости границ фаз;

– бинаризация методом *Otsu* или вручную задаваемым порогом.

– Сегментация: выделение контуров методом *cv.findContours* с фильтрацией по площади (исключаются объекты < 80 пикселей).

– Расчёт фрактальной размерности *Df*: реализован на основе алгоритма, предложенного в [18], с модификацией для работы с бинарными изображениями.

Алгоритм расчёта фрактальной размерности *Df*. Функция *fractal_dimension(Z, threshold=0.9)* выполняет следующие шаги:

1. Бинаризация: входное изображение *Z* преобразуется в бинарное:

$$Z_{bin} = (Z < \text{threshold}). \quad (1)$$

2. Определение масштабов: максимальный размер ячейки ограничивается минимальной стороной изображения $p = \min(\text{shape}(Z))$. Набор масштабов формируется как степени двойки:

$$Sizes=2^n, 2^{n-1}, \dots, 4. \quad (2)$$

3. Подсчёт ячеек: для каждого масштаба k изображение делится на непересекающиеся блоки размером $k \times k$. Подсчитывается количество блоков, содержащих хотя бы один чёрный пиксель, но не полностью заполненных (условие $(S > 0) \& (S < k \times k)$), что повышает устойчивость к шуму и сплошным областям.

4. Линейная регрессия: по точкам $(\log(sizes), \log(counts))$ строится линия методом наименьших квадратов. Фрактальная размерность определяется как

$$Df = -slope. \quad (3)$$

Этот подход отличается от классического box-counting тем, что исключает полностью белые и полностью чёрные ячейки, что особенно важно при анализе металлографических изображений с неоднородным фоном и локальными артефактами.

Классический метод подсчёта клеток в MATLAB. Для независимой верификации результатов был применён классический метод подсчёта клеток (box-counting method), реализованный в среде MATLAB R2021b (рис. 2). Данный метод является наиболее распространённым и теоретически обоснованным подходом для оценки фрактальной размерности двумерных объектов. Его суть заключается в покрытии бинарного изображения сеткой квадратных ячеек переменного размера r и подсчёте количества ячеек $N(r)$, содержащих хотя бы один чёрный пиксель (то есть принадлежащий анализируемому объекту).

Фрактальная размерность Df определяется как показатель степени в асимптотическом соотношении:

$$N(r) \propto r^{-Df}. \quad (4)$$

После логарифмирования это выражение принимает линейный вид:

$$\log(N(r)) = -Df \cdot \log(r) + C, \quad (5)$$

где C — константа.

Таким образом, фрактальная размерность Df вычисляется как угловое значение (наклон) линии линейной регрессии, аппроксимирующей зависимость $\log(N(r))$ от $\log(1/r)$ методом наименьших квадратов.

Алгоритм, реализованный в MATLAB, включает следующие этапы:

1. Загрузка исходного изображения и его преобразование в градации серого (*rgb2gray*).

2. Приведение изображения к стандартному размеру 1024×1024 пикселей (*imresize*) для обеспечения сопоставимости.

3. Бинаризация изображения (*imbinarize*) с автоматическим выбором порога.

4. Итеративное покрытие изображения сетками с размером ячейки $r = 2^i$, где $i=1,2,\dots,10$.

5. Подсчёт количества ячеек $N(r)$, содержащих чёрные пиксели.

6. Построение зависимости $\log(N(r))$ от $\log(1/r)$ и вычисление наклона линии регрессии с помощью функции *polyfit*.

```
clear all
close all
clc
img=imread('download.jpg');
figure
imshow(img)
img=rgb2gray(img);
img=imresize(img,[1024,1024]);
figure
imshow(img)
img=imbinarize(img);
figure
imshow(img)
magn_fac=zeros(9,1);
count=zeros(9,1);
[width,height]=size(img);
fprintf('Scaling factor \t Black Pixel Count \n')
for i=1:10
    factor_s=2^i;
    boxes=factor_s^2;
    box_width=width/factor_s;
    box_height=height/factor_s;
    num_black=0;
    for b_n=0:boxes-1
        present_x=idivide(int32(b_n),int32(factor_s));
        present_y = rem(b_n,factor_s);
        start_x = present_x*box_width + 1;
        last_x = start_x + box_width-1;
        start_y = present_y*box_height+1;
        last_y = start_y+ box_height -1;
        box= img([start_x:last_x],[start_y:last_y]);
        if (min(box(:))==0)
            num_black=num_black+1;
        end
    end
    fprintf('%d \t -> \t %d \n',factor_s,num_black);
    magn_fac(i)=factor_s;
    count(i)=num_black;
end
p = polyfit(log(count),-log(magn_fac),1);
plot(p)
D = polyfit(log(magn_fac),log(count),1)
```

Рис. 2. Код в среде MATLAB

Fig. 2. MATLAB code

Сравнение данных методов представлено в табл. 2.

В табл. 2 выше систематизированы ключевые параметры и методология, использованные в данном исследовании. Строгое следование этим параметрам, а также использование специально разработанного и оптимизированного программного обеспечения позволяют получить надежные и воспроизводимые результаты, что является основой для дальнейшего анализа и интерпретации полученных данных.

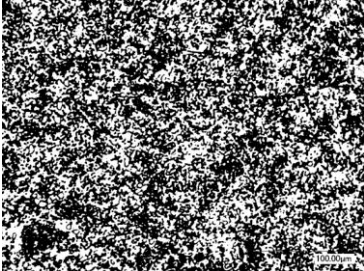
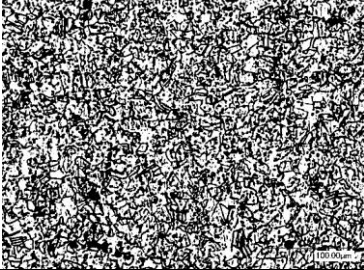
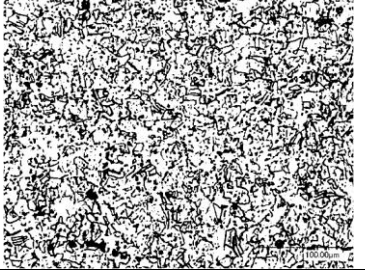
Результаты исследования и их обсуждение

Результаты фрактального анализа, представленные в табл. 3, рассчитаны для изображений исходной микроструктуры каждой из четырех марок сталей: 20X13, Y10A, 50 и 12X18H10T при увеличении $\times 1000$. Эти значения служат объективным количественным индексом сложности геометрии анализируемых объектов, будь то границы зерен, фазовые границы или распределение вторичных фаз. Для наглядности представления, помимо численных данных и исходных микроструктур, приводятся примеры изображений с наложенными сетками ячеек разного размера, что демонстрирует сам принцип работы метода подсчета ячеек.

Таблица 2. Сравнение методов расчета фрактальной размерности
Table 2. Comparison of methods for calculating fractal dimension

Параметр	Значение	
	Дифференциальный метод (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024660065)	Классический метод (MATLAB)
Алгоритм	Дифференциальный метод подсчета ячеек (box-counting)	Классический метод подсчета клеток (box-counting) без дополнительной фильтрации
Объект анализа	Исходные микроструктуры сталей 20X13, У10А, 50, 12X18Н10Т, полученные на цифровом микроскопе Keyence VHX1000	
Предварительная обработка изображений	Повышение контрастности и четкости + бинаризация	Бинаризация
Определяемые параметры	Df , количество контуров n , средний балл зерна	Df , размер ячейки r

Таблица 3. Результаты фрактального анализа изображений микроструктур
Table 3. Results of fractal analysis of microstructure images

Материал	Значения	
	Дифференциальный метод (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024660065)	Классический метод (MATLAB)
Сталь 20X13		
	$Df = 1,83 \ n = 1804$	$Df = 1,94 \ r = 0,1454$
Сталь У10А		
	$Df = 1,776 \ n = 844$	$Df = 1,91 \ r = 0,2131$
Сталь 50		
	$Df = 1,68 \ n = 289$	$Df = 1,92 \ r = 0,1606$
Сталь 12X18Н10Т		
	$Df = 1,797 \ n = 899$	$Df = 1,835 \ r = 0,3656$

Для хромистой нержавеющей стали 20Х13, которая имеет мартенситную структуру, был проведен анализ фрактальной размерности или морфологии мартенситных пластин. Полученные значения фрактальной размерности составили 1,83 (1,94). Эти значения являются достаточно высокими и характерны для структур с развитой внутренней текстурой. Мартенсит представляет собой совокупность игольчатых кристаллов (пластин), рост которых ограничивается взаимодействием с уже сформированными кристаллами и границами зерен, вследствие чего их взаимное пересечение в строгом смысле не реализуется. Размер мартенситных игл традиционно оценивается по балльной шкале (ГОСТ 8233-56). Фрактальная размерность в данном случае не заменяет балльную оценку мартенсита, а характеризует геометрическую сложность пространственного распределения игл и их морфологическую неоднородность. Значения D_f свидетельствуют о значительной сложности и развитости мартенситной структуры, которая характеризуется высокой плотностью дислокаций и внутренними напряжениями, что напрямую связано с высокой твердостью и прочностью данной стали.

Для углеродистой инструментальной стали У10А основной целью анализа было количественное определение сложности и непрерывности карбидной сетки, образующейся по границам аустенитных зерен в процессе полного отжига (температура нагрева выше A_{cm}). Карбидная сетка является критическим дефектом, так как она значительно снижает вязкость и износостойкость стали. Фрактальная размерность, рассчитанная для этой сетки, составляет 1,776 (1,91). Такое высокое значение D_f близко к максимально возможному для двумерного объекта (равному 2,0), что свидетельствует о чрезвычайно сложной, извилистой и плотно заполняющей пространство структуре. Это указывает на высокую степень развития и «замкнутость» сетки, что полностью соответствует визуальному анализу. Чем выше значение D_f , тем более фрагментированной и сложной является структура.

В случае конструкционной углеродистой стали 50, которая имеет ферритно-перлитную структуру, была проанализирована фрактальная размерность границ ферритных зерен. Для данной стали полученные значения составляют 1,68 (1,92). Эти значения находятся в среднем диапазоне и характеризуют ферритные зерна как элементы со сравнительно гладкими и низкой степенью извилистости границами. Такая структура типична для нормализованных конструкционных сталей, где происходит фазовая перекристаллизация и, как правило, измельчения зерна. Значение D_f говорит о том, что границы зерен не являются сильно развитыми или извилистыми, что является благоприятным фактором для повышенной пластичности материала.

Для аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т, используемой в агрессивных средах, особый интерес представляет структура границ зерен, так как именно они могут являться путями для межкристаллитной коррозии. Анализ границ зерен этой стали дал значения фрактальной размерности 1,797 (1,835). Эти высокие значения D_f указывают на то, что границы зерен имеют

максимальную извилистость и не являются гладкими. Гладкие границы могут быть менее эффективными в качестве барьеров для дислокаций (что снижает прочность), для коррозионной стойкости они могут быть предпочтительнее, так как уменьшается общая площадь границ, доступных для воздействия коррозионной среды. Кроме того, фрактальный анализ может косвенно характеризовать долю различных типов границ: например, высокая доля низкоугловых границ зерен, которые очень устойчивы к коррозии, может приводить к снижению общей фрактальной размерности [14].

Таким образом, представленные результаты наглядно демонстрируют возможность использования фрактальной размерности как объективного количественного параметра для описания и сравнения сложности микроструктур различных марок сталей. Полученные численные значения позволяют перейти от качественных характеристик («сетка развита», «зерна мелкие») к точным цифровым метрикам, которые могут быть использованы для дальнейшего анализа и прогнозирования свойств.

При фрактальном анализе изображений микроструктур (см. табл. 3) учитывались «подсвеченные» перлитные участки для стали 50. Наиболее ярко они проявлялись при использовании дифференциального метода. Для исключения влияния перлитных участков с повышенной яркостью необходима дополнительная морфологическая фильтрация бинарных изображений (например, операция открытия/закрытия), а также анализ чувствительности результатов к порогу бинаризации.

Значения фрактальной размерности D_f , полученные классическим методом подсчета клеток в MATLAB, всегда были выше, чем при расчете с помощью разработанной программы для ЭВМ на 7-10%. Скорее всего, это связано с различиями в алгоритмической обработке бинарных изображений: классический метод учитывает все ячейки, содержащие хотя бы один черный пиксель, включая полностью заполненные области (например, сплошные фазы или включения, а также нечетко выявленные элементы структуры, связанные с подготовкой микрошлифа и его травления), что искусственно завышает количество «активных» ячеек на крупных масштабах и, как следствие, увеличивает наклон регрессионной зависимости $\log N(r)$ от $\log(1/r)$. В то же время реализованный в авторском ПО алгоритм применяет фильтрацию по степени заполнения ячейки, исключая из расчета как полностью белые, так и полностью черные блоки (условие $0 < S < k^2$). Такой подход повышает чувствительность метода к истинной геометрической сложности границ фаз и микрон неоднородностей, игнорируя вклад однородных областей, которые не несут информации о фрактальной природе структуры. Таким образом, более низкие значения D_f , полученные с помощью разработанного программного обеспечения, отражают более точную оценку морфологической сложности микроструктуры, свободную от влияния сплошных фаз и включений. Различия значений D_f объясняются тем, что авторский алгоритм более устойчив к локальным неоднородностям благодаря

CLANE-усилению контраста и фильтрации ячеек по степени заполнения. Это делает его особенно пригодным для анализа реальных микроструктур, полученных в промышленных условиях.

Полученные значения фрактальной размерности для микроструктур сталей 20X13, У10А, 50 и 12X18Н10Т представляют собой не просто абстрактные числа, а содержательные количественные характеристики, которые могут быть интерпретированы в тесной связи с физикой металлов и технологией обработки. Сопоставление полученных данных с известными фактами о составе, структуре и свойствах рассматриваемых сталей позволяет глубже понять природу связей между микроструктурой и макроскопическими параметрами.

Корреляция между фрактальной размерностью микроструктуры и макроскопическими механическими свойствами, такими как прочность и твердость, является одной из ключевых областей применения фрактального анализа в материаловедении [2, 19]. В одном из исследований было показано, что фрактальный анализ позволяет установить корреляцию между микроструктурой и механическими свойствами [4]. Корреляция между сложностью структуры и механическими свойствами была продемонстрирована в ряде исследований, где было показано, что параметры микроструктуры, такие как размер и расстояние между твердыми фазами, напрямую влияют на усталостную прочность [15].

Форма и распределение фаз критически влияют на пластические деформации и работу упрочнения [16, 17]. Хотя крупнозернистая структура нежелательна для большинства конструкционных сталей из-за эффекта хрупкости при понижении температуры, для некоторых аустенитных нержавеющей сталей она может быть допустима. В контексте коррозионной стойкости гладкие низкодисперсные границы зерен могут быть даже предпочтительнее, так как они уменьшают общую площадь, доступную для коррозионного воздействия, особенно в случаях межкристаллитной коррозии [13]. В статье [14] было показано, что материал с микроструктурой, состоящей из низкоугловых границ зерен и двойников, обладает более высокой стойкостью к коррозии. Таким образом, низкая фрактальная размерность может косвенно указывать на высокую долю таких благоприятных типов границ.

Необходимо также обсудить потенциальные ограничения и факторы, влияющие на точность методов. Во-первых, фрактальная размерность является масштабно-зависимой величиной. Расчет проводится в определенном диапазоне масштабов, и результат может меняться, если этот диапазон будет расширен или сужен. Необходимо выбирать диапазон, соответствующий области самоподобия анализируемого объекта. Во-вторых, результаты чувствительны к параметрам предобработки изображения, в частности к порогу бинаризации для двоичных изображений [20]. В данном исследовании были использованы различные методы с отличающимися параметрами предварительной обработки, что позволило оценить влияние этих факторов. В-третьих, следует помнить, что фрактальная размерность является лишь одной из мер сложности. Для более полного описания

неоднородных структур может потребоваться применение мультискального анализа, который предоставляет дополнительные параметры, такие как *информационная энтропия* и *корреляционная размерность* [21]. Тем не менее даже базовая фрактальная размерность, рассчитанная методом дифференциального подсчета ячеек (box-counting), уже предоставляет мощный и объективный инструмент для количественного анализа и сравнения микроструктур.

Следует отметить, что фрактальная размерность не является прямым аналогом традиционных металлографических параметров, регламентированных ГОСТ (балл зерна, балл мартенсита и др.), а представляет собой дополнительный интегральный показатель геометрической сложности. Таким образом, фрактальный анализ целесообразно рассматривать как вспомогательный инструмент, дополняющий стандартные методы количественной металлографии, прежде всего при анализе границ зерен и фазовых интерфейсов. Полученные значения D_f могут служить входными данными для машинного обучения, например для нейронных сетей, предназначенных для прогнозирования механических свойств стали по ее изображению [22]. Также D_f может использоваться как контролируемый параметр в процессе оптимизации термической обработки, позволяя достичь целевой сложности микроструктуры для получения заданных свойств. Таким образом, фрактальная размерность становится не просто описательным параметром, а управляемым фактором в цифровом материаловедении [23].

Заключение

Настоящее исследование подтвердило высокую эффективность фрактальной размерности как объективного и количественного параметра для оценки сложности микроструктур сталей. Путем применения метода дифференциального подсчета ячеек (box-counting), реализованного в специально разработанном и защищенном патентом программном обеспечении, удалось количественно охарактеризовать и сравнить микроструктурные особенности четырех различных марок сталей: 20X13, У10А, 50 и 12X18Н10Т. Полученные значения фрактальной размерности не только подтвердили визуальные представления о характере этих структур, но и предоставили им строгую численную оценку. Это позволяет перейти от субъективных, качественных описаний к объективному, воспроизводимому количественному анализу, что является ключевым требованием современного материаловедения. Таким образом, фрактальная размерность выступает в роли связки между визуально наблюдаемой морфологией структуры и механическими свойствами материала.

Научная новизна данного исследования определяется двумя основными аспектами. Во-первых, это систематическое применение фрактального анализа к конкретному и технологически важному набору сталей, каждый из которых представляет особый интерес с точки зрения их микроструктурных особенностей и обла-

сти применения. Во-вторых, использование собственного программного комплекса, защищенного авторским свидетельством РФ № RU 2024660065. Это свидетельствует о разработке оригинального, оптимизированного и методологически строгого инструмента для проведения фрактального анализа, что повышает точность и надежность получаемых результатов по сравнению с использованием стандартных коммерческих или открытых программных продуктов.

Практическая ценность полученных результатов весьма высока. Представленный подход может быть успешно интегрирован в практику контроля качества продукции в металлургической промышленности. Фрактальная размерность может служить объективным, количественным показателем соответствия микроструктуры заданным технологическим режимам термической обработки. Более того, полученные данные могут быть использованы для обучения моделей машинного обучения, которые смогут по изображению микроструктуры прогнозировать ее механические свойства, что является перспективным направлением в материаловедении. В заключение фрактальный анализ и, в частности, расчет фрактальной размерности доказывают свою состоятельность как мощный, универсальный и объективный метод для количественной оценки микроструктуры металлов, открывая новые возможности для ее изучения, контроля и управления свойствами материалов.

Список источников

- Chermant J.L., Coster M. Quantitative fractography // *J Mater Sci.* 1979, 14, 509–534. <https://doi.org/10.1007/BF00772710>.
- Macroscopic mechanical properties and microstructure characteristics of steel slag fine aggregate concrete / Gang Xue, Qian Fu, Sheng Xu, Jingjun Li // *Journal of Building Engineering.* 2022, vol. 56, 104742. ISSN 2352-7102. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104742>.
- R.P.M. Procter, 1.03 - Outline of Structural Metallurgy Relevant to Corrosion / Bob Cottis, Michael Graham, Robert Lindsay, Stuart Lyon, Tony Richardson, David Scantlebury, Howard Stott // *Shreir's Corrosion*, Elsevier, 2010, pp. 52-76. ISBN 9780444527875. <https://doi.org/10.1016/B978-044452787-5.00201-8>.
- Automatic Recognition of SEM Microstructure and Phases of Steel using LBP and Random Decision Forest Operator / Gupta Subir, Sarkar Jit, Kundu Malay, Bandyopadhyay N., Ganguly Subhas // *Measurement.* 2020, 151, 107224. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107224>.
- Garashchenko Ya., Glushko A., Kobet O., Harashchenko O. Fractal Analysis of Structural and Phase Changes in the Metal of Welded Steam Pipe Joints. 2021. [10.1007/978-3-030-77719-7_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_4).
- Experimental comparison of mechanical properties and fractal characteristics of geothermal reservoir rocks after different cooling treatments / Yan Xi, Haoyu Wang, Jun Li, Wentao Dong, Han Li, Boyun Guo // *Energy Reports*, 2022, vol. 8, pp. 5158-5176. ISSN 2352-4847. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.03.207>.
- Krajewski Slawomir, Nowacki J. Dual-phase steels microstructure and properties consideration based on artificial intelligence techniques // *Archives of Civil and Mechanical Engineering.* 2014, vol. 14, pp. 278-286. DOI: 10.1016/j.acme.2013.10.002.
- An automated morphological classification of ferrite-martensite dual-phase microstructures / Tanusree Dutta, Debdulal Das, Siddhartha Banerjee, Sanjoy Kumar Saha, Shubhabrata Datta // *Measurement.* 2019, vol. 137, pp. 595-603. ISSN 0263-2241. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.106>.
- Automatic estimation of mechanical properties from fractographs using optimal anisotropic diffusion and Voronoi tessellation / Samik Dutta, Abhishek Karmakar, Himadri Roy, Kaustav Barat // *Measurement.* 2019, vol. 134, pp. 574-585. ISSN 0263-2241. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.10.100>.
- Swastik Soni, Abhishek Tiwari, R.N. Singh. Quantitative fractography in the DBT regime of 9Cr-1Mo ferritic/martensitic steel // *Procedia Structural Integrity.* 2025, vol. 68, pp. 513-519. ISSN 2452-3216. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2025.06.090>.
- Fractal analysis and its impact factors on pore structure of artificial cores based on the images obtained using magnetic resonance imaging / Heming Wang, Yu Liu, Yongchen Song, Yuechao Zhao, Jiafei Zhao, Dayong Wang // *Journal of Applied Geophysics.* 2012, vol. 86, pp. 70-81. ISSN 0926-9851. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.07.015>.
- Fractal Characteristics and Significance of Different Pore Types of the Wufeng–Longmaxi Formation, Southern Sichuan Basin, China, Based on N2 Adsorption and Image Analysis / Yang Chen, Hongming Tang, Majia Zheng, Changsheng Li, Shengxian Zhao, Ning Zhao, and Yijiang Leng // *ACS Omega.* 2021, 6 (46), 30889-30900. DOI: 10.1021/acsomega.1c02539.
- Grain boundary design based on fractal theory to improve intergranular corrosion resistance of TWIP steels / Hao Fu, Wei Wang, Xiaojun Chen, Giorgio Pia, Jinxi Li // *Materials & Design.* 2020, vol. 185, 108253. ISSN 0264-1275. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108253>.
- Effect of grain size and grain boundary type on intergranular stress corrosion cracking of austenitic stainless steel: A phase-field study / Qionghuan Zeng, Yiming Chen, Zhongsheng Yang, Lei Zhang, Zhijun Wang, Lei Wang, Junjie Li, Jincheng Wang // *Corrosion Science.* 2024, vol. 241, 112557. ISSN 0010-938X. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2024.112557>.
- Influence of hard phase size and spacing on the fatigue crack propagation in tool steels - Numerical simulation and experimental validation / Brackmann L, Wingender D, Weber S, Balzani D, Röttger A. // *Fatigue Fract Eng Mater Struct.* 2023, vol. 46, no. 10, pp. 3872-3891. DOI: 10.1111/ffe.14107.
- Statistical and theoretical analysis of precipitates in dual-phase steels microalloyed with titanium and their effect on mechanical properties / R. Soto, W. Saikaly, X. Bano, C. Issartel, G. Rigaut, A. Charai // *Acta Materialia.* 1999, vol. 47, is. 12, pp. 3475-3481. ISSN 1359-6454. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(99\)00190-1](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00190-1).
- In Situ EBSD Observation and Numerical Simulation of Microstructure Evolution and Strain Localization of DP780 Dual-Phase Steel / Ren Y., Li S., Feng S., Li Y.,

- Yuan C. // Materials. 2025, 18, 426. <https://doi.org/10.3390/ma18020426>
 18. Grassberger P. On efficient box counting algorithms // International Journal of Modern Physics. 1993, vol. 4, no. 3, pp. 515–523.
 19. Hilders O.A., Zambrano N., Caballero R. Microstructure, Strength, and Fracture Topography Relations in AISI 316L Stainless Steel, as Seen through a Fractal Approach and the Hall-Petch Law // International Journal of Metals. 2015, 624653, 10 pages. <https://doi.org/10.1155/2015/624653>
 20. Dependence of multifractal analysis parameters on the darkness of a processed image /Merike Martsepp, Tõnu Laas, Katrin Laas, Jaanis Priimets, Siim Tõkke, Valdek Mikli // Chaos, Solitons & Fractals, 2022, vol. 156, 111811. ISSN 0960-0779. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.111811>.
 21. Чумак О.В. Энтропии и фракталы в анализе данных. М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2011. 164 с.
 22. Predictive Modeling of Hardness Values and Phase Fraction Percentages in Micro-Alloyed Steel during Heat Treatment Using AI / Bassi A., Bodas S.T., Hasan S.S., Sidhu G., Srinivasan S. // Metals. 2024, 14, 49. <https://doi.org/10.3390/met14010049>
 23. Кабалдин Ю.Г. Цифровое материаловедение. Прогнозирование структуры и механических свойств новых материалов // Вестник машиностроения. 2025. Т. 104, № 4. С. 344-349. DOI: 10.36652/0042-4633-2025-104-4-344-349. EDN TPBBKV.
- References**
1. Chermant J.L., Coster M. Quantitative fractography. J Mater Sci. 1979;14:509-534. DOI: 10.1007/BF00772710.
 2. Xue G., Fu Q., Xu S., Li J. Macroscopic mechanical properties and microstructure characteristics of steel slag fine aggregate concrete. Journal of Building Engineering. 2022;56:104742. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104742.
 3. Procter R.P.M, Bob Cottis, Michael Graham, Robert Lindsay, Stuart Lyon, Tony Richardson, David Scantlebury, Howard Stott. Outline of structural metallurgy relevant to corrosion. Shreir's Corrosion. Elsevier, 2010, pp. 52-76. DOI: 10.1016/B978-044452787-5.00201-8.
 4. Gupta S., Sarkar J., Kundu M., Bandyopadhyay N., Ganguly S. Automatic recognition of SEM microstructure and phases of steel using LBP and random decision forest operator. Measurement. 2020;151:107224. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107224.
 5. Garashchenko Ya., Glushko A., Kobet O., Harashchenko O. Fractal analysis of structural and phase changes in the metal of welded steam pipe joints. 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-77719-7_4.
 6. Xi Y., Wang H., Li J., Dong W., Li H., Guo B. Experimental comparison of mechanical properties and fractal characteristics of geothermal reservoir rocks after different cooling treatments. Energy Reports. 2022;8:5158-5176. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.03.207.
 7. Krajewski S., Nowacki J. Dual-phase steels microstructure and properties consideration based on artificial intelligence techniques. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2014;14:278-286. DOI: 10.1016/j.acme.2013.10.002.
 8. Dutta T., Das D., Banerjee S., Saha S.K., Datta S. An automated morphological classification of ferrite-martensite dual-phase microstructures. Measurement. 2019;137:595-603. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.12.106.
 9. Dutta S., Karmakar A., Roy H., Barat K. Automatic estimation of mechanical properties from fractographs using optimal anisotropic diffusion and Voronoi tessellation. Measurement. 2019;134:574-585. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.10.100.
 10. Soni S., Tiwari A., Singh R.N. Quantitative fractography in the DBT regime of 9Cr-1Mo ferritic/martensitic steel. Procedia Structural Integrity. 2025;68:513-519. DOI: 10.1016/j.prostr.2025.06.090.
 11. Wang H., Liu Y., Song Y., Zhao Y., Zhao J., Wang D. Fractal analysis and its impact factors on pore structure of artificial cores based on the images obtained using magnetic resonance imaging. Journal of Applied Geophysics. 2012;86:70-81. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2012.07.015.
 12. Chen Y., Tang H., Zheng M., Li C., Zhao S., Zhao N., Leng Y. Fractal characteristics and significance of different pore types of the Wufeng-Longmaxi Formation, Southern Sichuan Basin, China, based on N2 adsorption and image analysis. ACS Omega. 2021;6(46):30889-30900. DOI: 10.1021/acsomega.1c02539.
 13. Fu H., Wang W., Chen X., Pia G., Li J. Grain boundary design based on fractal theory to improve intergranular corrosion resistance of TWIP steels. Materials & Design. 2020;185:108253. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108253.
 14. Zeng Q., Chen Y., Yang Z., Zhang L., Wang Z., Wang L., Li J., Wang J. Effect of grain size and grain boundary type on intergranular stress corrosion cracking of austenitic stainless steel: A phase-field study. Corrosion Science. 2024;241:112557. DOI: 10.1016/j.corsci.2024.112557.
 15. Brackmann L., Wingender D., Weber S., Balzani D., Röttger A. Influence of hard phase size and spacing on the fatigue crack propagation in tool steels - Numerical simulation and experimental validation. Fatigue Fract Eng Mater Struct. 2023;46(10):3872-3891. DOI: 10.1111/ffe.14107.
 16. Soto R., Saikaly W., Bano X., Issartel C., Rigaut G., Charai A. Statistical and theoretical analysis of precipitates in dual-phase steels microalloyed with titanium and their effect on mechanical properties. Acta Materialia. 1999;47(12):3475-3481. DOI: 10.1016/S1359-6454(99)00190-1.
 17. Ren Y., Li S., Feng S., Li Y., Yuan C. In situ EBSD observation and numerical simulation of microstructure evolution and strain localization of DP780 dual-phase steel. Materials. 2025;18:426. DOI: 10.3390/ma18020426.
 18. Grassberger P. On efficient box counting algorithms. International Journal of Modern Physics. 1993;4(3):515-523.
 19. Hilders O.A., Zambrano N., Caballero R. Microstructure, strength, and fracture topography relations in AISI 316L stainless steel, as seen through a fractal approach and the Hall-Petch law. International Journal of Metals. 2015;624653:10. DOI: 10.1155/2015/624653.
 20. Martsepp M., Laas T., Laas K., Priimets J., Tõkke S., Mikli V. Dependence of multifractal analysis parameters on the darkness of a processed image. Chaos, Solitons & Fractals. 2022;156:111811. DOI: 10.1016/j.chaos.2022.111811.
 21. Chumak O.V. *Энтропии и фракталы в анализе данных* [Entropies and fractals in data analysis]. Moscow; Izhevsk: SRC Regular and Chaotic Dynamics, Institute of Computer Research Publishing House, 2011, 164 p. (In Russ.)

22. Bassi A., Bodas S.T., Hasan S.S., Sidhu G., Srinivasan S. Predictive modeling of hardness values and phase fraction percentages in micro-alloyed steel during heat treatment using AI. *Metals*. 2024;14:49. DOI: 10.3390/met14010049.
23. Kabaldin Yu.G. Digital materials science. Prediction of the structure and mechanical properties of new materials. *Vestnik mashinostroeniya* [Vestnik of mechanical engineering]. 2025;104(4):344-349. (In Russ.) DOI: 10.36652/0042-4633-2025-104-4-344-349. EDN TPBBKV.

Поступила 30.01.2026; принята к публикации 23.03.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 30/01/2026; revised 23/03/2026; published 30/09/2026

Башков Андрей Алексеевич – старший преподаватель кафедры «Технология и оборудование машиностроения»,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: bashkov.aa@nntu.ru. ORCID: 0000-0002-6658-0197.

Аносов Максим Сергеевич – кандидат технических наук,
доцент кафедры «Технология и оборудование машиностроения»,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: anosov-maksim@list.ru. ORCID: 0000-0001-8150-9332.

Иванов Сергей Владимирович – инженер ИОЦ ИПТМ,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: ivanov.serega.2016@mail.ru. ORCID: 0009-0009-5614-4656.

Баженов Евгений Олегович – старший преподаватель кафедры «Машиностроительные технологические комплексы»,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: bazhenov98evgenii@mail.ru. ORCID: 0000-0003-0193-6065.

Акулова Анна Александровна – инженер ИПТМ,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: akulova.anna98@mail.ru. ORCID: 0009-0002-6553-3433.

Чичеватов Алексей Васильевич – инженер-исследователь,
филиал ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова», Нижний Новгород, Россия.
Email: avchichevatov@mail.ru.

Andrey A. Bashkov – Senior Lecturer at the Department of Technology and Equipment of Mechanical Engineering,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: bashkov.aa@nntu.ru. ORCID 0000-0002-6658-0197.

Maxim S. Anosov – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Technology and Equipment of Mechanical Engineering,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: anosov-maksim@list.ru. ORCID 0000-0001-8150-9332.

Sergey V. Ivanov – Engineer at the Information and Educational Center of the Institute of Industrial Engineering Technologies,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: ivanov.serega.2016@mail.ru. ORCID: 0009-0009-5614-4656

Evgeny O. Bazhenov – Senior Lecturer at the Department of Mechanical Engineering Technological Complexes,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: bazhenov98evgenii@mail.ru. ORCID: 0000-0003-0193-6065.

Anna A. Akulova – Engineer of the Institute of Industrial Engineering Technologies,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: akulova.anna98@mail.ru. ORCID: 0009-0002-6553-3433.

Alexey V. Chichevatov – Research Engineer,
Y.E. Sedakov Research Institute of Measuring Systems, a branch of the Russian Federal Nuclear Center,
All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: avchichevatov@mail.ru.



ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОМПЛЕКСА Cr – N НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ И ПАРАМЕТРЫ МИКРОСТРУКТУРЫ СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК

Феоктистов Н.А., Савинов А.С.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Эксплуатационные свойства литых изделий определяют ресурс их работы при эксплуатации. На износостойкость в первую очередь влияет химический состав, а также условия кристаллизации изделия. **Цель работы.** Изучить влияние комплекса Cr – N на эксплуатационные свойства высокомарганцевой стали. **Используемые методы.** Объект исследования – высокомарганцевая сталь, легированная комплексом Cr – N, а также закристаллизовавшаяся в литейной форме при различных скоростях охлаждения. Исследования структуры и свойств проводили на опытных отливках в литом состоянии, а также после термической обработки. Оценка параметров микроструктуры опытных сталей проводилась при помощи оптического и электронного микроскопа, износостойкость оценивали через коэффициент абразивной и ударно-абразивной износостойкости по ГОСТ 23.208-79 и ГОСТ 23.207-79. **Новизна.** Определены концентрационные интервалы по содержанию хрома и азота, при которых коэффициенты абразивной и ударно-абразивной износостойкости имеют максимальные значения. **Результат.** Выявлены закономерности влияния скорости охлаждения расплава в комплексе с хромом и азотом на коэффициенты абразивной и ударно-абразивной износостойкости, а также изменение количественных характеристик карбидной фазы. Определено влияние этих факторов на коэффициент анизотропии зерна аустенита, оказывающий сильное влияние на механические и эксплуатационные свойства отливок. Определено влияние термической обработки на химический состав сплава и обезуглероживания поверхности опытных отливок, а также количественные характеристики микроструктуры. **Практическая значимость.** В работе сформулированы рекомендации использования комплекса Cr – N для легирования стали Гадфильда с целью получения заданных характеристик.

Ключевые слова: высокомарганцевая сталь, хром, азот, износостойкость, карбидная фаза, размера зерна, аустенит, марганец, цементит

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России (проект FZRU-2026-0003).

© Феоктистов Н.А., Савинов А.С., 2026

Для цитирования

Феоктистов Н.А., Савинов А.С. Оценка влияния комплекса Cr – N на износостойкость и параметры микроструктуры стальных отливок // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 93-99. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-93-99>



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

ASSESSMENT OF THE EFFECT OF THE Cr – N COMPLEX ON THE WEAR RESISTANCE AND MICROSTRUCTURAL PARAMETERS OF STEEL CASTINGS

Feoktistov N.A., Savinov A.S.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The service properties of cast products determine their service life under operating conditions. Wear resistance is primarily affected by the chemical composition, as well as by the solidification conditions of the product. **Objectives.** The research is aimed at investigating the effect of the Cr–N complex on the service properties of high-manganese steel. **Methods Applied.** The research object is high-manganese steel alloyed with the Cr–N complex and solidified in a casting mold at different cooling rates. The structure and properties have been studied using experimental castings in the as-cast condition and after heat treatment. The microstructural parameters of the experimental steels have been evaluated using optical and electron microscopy. Wear resistance has been assessed using the coefficients of abrasive and impact-abrasive wear resistance in accordance with GOST 23.208-79 and GOST 23.207-79. **Originality.** Concentration ranges of chromium and nitrogen have been determined at which the coefficients of abrasive and impact-abrasive wear resistance reach their maximum values. **Results.** The patterns of the effect of melt cooling rate in combination with chromium and nitrogen on the coefficients of abrasive and impact-abrasive wear resistance, as well as on changes in the quantitative characteristics of the carbide phase, have been identified. The effect of these factors on the austenite grain anisotropy coefficient, which has a significant influence on the mechanical and service properties of castings, has been determined. The effect of heat treatment on the chemical composition of the alloy and surface decarburization of the experimental castings, as well as on the quantitative characteristics of the microstructure, has been determined. **Practical Relevance.** Recommendations are formulated for the use of the Cr–N complex as an alloying addition to Hadfield steel in order to obtain specified performance characteristics.

Keywords: high-manganese steel, chromium, nitrogen, wear resistance, carbide phase, grain size, austenite, manganese, cementite

This research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project FZRU-2026-0003)

For citation

Feoktistov N.A., Savinov A.S. Assessment of the Effect of the Cr – N Complex on the Wear Resistance and Microstructural Parameters of Steel Castings. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 93-99. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-93-99>

Введение

В настоящее время потребители литейной продукции предъявляют всё более жесткие требования к её качеству. В первую очередь это касается деталей, работающих в тяжёлых условиях эксплуатации: в условиях действия повышенных температур, агрессивных сред, абразивного и ударно-абразивного изнашивания, действия высоких контактных нагрузок. Для каждой группы деталей используются сплавы, предназначенные для работы в таких условиях.

Среди множества сталей, применяющихся в качестве конструкционных материалов для отливок, работающих в условиях различных видов изнашивания, наиболее распространённой является высокомарганцевая сталь, в частности сталь Гадфильда. Несмотря на то, что она применяется в промышленности с давних времён, интерес к ней не пропадает по сегодняшний день как среди отечественных исследователей, так и среди зарубежных.

Авторы работ [1–3] занимались изучением влияния химического состава стали Гадфильда на такие свойства, как ударная вязкость и твёрдость. Они построили ряд элементов по уменьшению степени влияния на эти свойства. В работах [4–7] изучен вопрос влияния таких легирующе-модифицирующих элементов и комплексов, как титан, кальций, ванадий, кальций-стронциевый карбонаты и редкоземельные металлы, на прочностные и пластические свойства высокомарганцевой стали, а также на её микроструктуру. Отмечено положительное действие этих элементов на указанные параметры. В работах [5–7] установлено влияние карбоната на величину переохлаждения, которая снижается с 40 до 10°C при введении карбоната в сталь порядка 0,8% от массы обрабатываемого металла. При этом уменьшается размер карбидов с 18–145 до 5–15 мкм, зерно измельчается до 3–4 баллов, а ударная вязкость увеличивается максимум на 40%.

Однако в этих работах осталось неизученным влияние химического состава стали на главное её свойство – износостойкость. Износостойкость стали Гадфильда определяется множеством факторов, таких как химический состав, тепловое формирование отливки в форме (скорость охлаждения расплава), режим термической обработки и т.д.

Значительное влияние на износостойкость оказывают тепловые условия формирования отливок в литейной форме, а именно скорость охлаждения расплава в форме. Исследованию этого влияния посвящён ряд работ [8–11]. В них отмечено, что скорость охлаждения расплава в литейной форме воздействует на размер зерна аустенита и параметры карбидной фазы. В зависимости от скорости охлаждения абразивная износостойкость этой стали может изменяться более чем на 20%. Кроме того, в работах [9, 10] установлено, что скорость охлаждения расплава в форме влияет на энергию дефектов упаковки, величина которой определяет механизм упрочнения этой стали (деформационное двойникование или дислокационное скольжение) под действием внешних нагрузок. Также авторы работ установили зависимость между энергией дефектов упаковки и абразивной износостойкостью.

Для того чтобы сформулировать адекватные рекомендации по использованию этой стали в качестве конструкционного материала для работы в тех или иных условиях (абразивный или ударно-абразивный износ), необходимо оценить её износостойкость в различных условиях, влияние на это свойство легирования тем или иным элементом в комплексе с тепловыми условиями формирования отливки в литейной форме.

Материалы и методы исследования

Экспериментальные сплавы для изучения структуры и свойств выплавляли в индукционной печи ИСТ-006 с основной футеровкой. Термическую обработку образцов проводили в окислительной среде. Легирование стали Гадфильда осуществляли азотированным феррохромом марки ФХН – 1, химический состав которого, мас. доля, %: 66,2 Cr; 0,06 C; 0,72 Si; 0,003 P; 0,004 S; 0,09 Al; 11,1 N.

Исследования проводили на стандартных образцах с размерами 35×35×10 мм. Для реализации раз-

личных скоростей охлаждения сплав заливали в разные типы форм: сухую и сырую песчано-глинистую, кокиль. Регистрацию изменения температуры металла проводили с помощью заформованной вольфрам-рениевой термопары, запись результатов осуществляли на приборе LA-50USB с частотой 50 Гц на каждый канал. Химический состав образцов определяли на спектрометре SPECTRMAXx.

Размер зерен и количественный анализ проводили на оптическом микроскопе Meiji с помощью программы Ticsomet Standart Pro по ГОСТ 5639-82. Для микроанализа из образца по стандартной методике были приготовлены микрошлифы путём запрессовки образцов в смолу «Transoptic» на автоматическом прессе Simplotmet 1000 на линии пробоподготовки фирмы Buechler. Для выявления микроструктуры поверхность шлифов подвергали травлению в 4%-м растворе азотной кислоты в этиловом спирте методом погружения полированной поверхности в ванну с реактивом.

Микротвердость определяли на твердомере Buchler Mikromet в соответствии с ГОСТ 9450-60 методом вдавливания алмазной пирамидки с углом между противоположными гранями 136° при нагрузке 200 г и длительности нагружения 10 с. Твердость определяли на твердомере EmcoTest M4C 075 G3 в соответствии с ГОСТ 9013-59.

Абразивную износостойкость сплавов изучали в соответствии с ГОСТ 23.208-79, ударно-абразивную – с ГОСТ 23.207 – 79.

Полученные результаты и их обсуждение

Проведя серию экспериментов по выплавке и легированию высокомарганцевой стали марки 110Г13Л азотированным феррохромом марки ФХН – 10, получили экспериментальные образцы, химический состав которых в литом и термообработанном состоянии представлен в **табл. 1**. Концентрация алюминия находилась в пределах от 0,08 до 0,06%.

Результаты испытаний образцов на абразивную и ударно-абразивную износостойкость, выраженные в виде коэффициентов износостойкости, представлены в **табл. 2**.

Таблица 1. Химический состав экспериментальных отливок
Table 1. Chemical composition of the experimental castings

№ п/п	Концентрация химических элементов, %													
	C, %		Si, %		Mn, %		P, %		S, %		Cr, %		N, %	
	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**
1	1,15	0,60	1,05	0,65	11,6	11,3	0,04	0,050	0,033	0,045	0,85	0,84	0,03	0,033
2	1,10	0,59	1,18	0,81	11,75	9,8	0,04	0,046	0,035	0,048	1,40	1,35	0,06	0,062
3	1,07	0,70	0,90	0,87	11,55	11,7	0,04	0,050	0,032	0,045	1,91	1,90	0,12	0,127
4	1,20	0,33	0,74	0,93	11,60	10,4	0,04	0,056	0,033	0,032	2,15	2,08	0,135	0,137
5	1,15	0,42	1,08	0,98	11,75	11,3	0,04	0,043	0,033	0,040	3,15	3,15	0,345	0,351

* Концентрация элемента до термической обработки.

** Концентрация элемента после термической обработки.

Таблица 2. Значения коэффициента абразивной и ударно-абразивной износостойкости в зависимости от концентрации хрома в стали, типа формы и состояния металла

Table 2. Values of the coefficients of abrasive and impact-abrasive wear resistance depending on the chromium concentration in the steel, mold type, and metal condition

Номер образца	Абразивный износ			Ударно-абразивный износ		
	Сырая ПГФ Л/ТО	Сухая ПГФ Л/ТО	Кокиль Л/ТО	Сырая ПГФ Л/ТО	Сухая ПГФ Л/ТО	Кокиль Л/ТО
1	1,0 / 1,38	1,25 / 1,39	1,09 / 1,48	- / -	- / -	- / -
2	1,67 / 1,28	1,62 / 1,31	1,76 / 1,23	1,59 / 1,2	1,43 / 1,4	0,91 / 0,99
3	1,55 / 1,32	1,47 / 1,41	1,58 / 1,25	1,76 / 1,14	1,14 / 1,13	0,88 / 1,17
4	2,08 / 1,19	2,05 / 1,44	2,11 / 1,35	2,11 / 1,66	0,87 / 0,89	1,42 / 1,32
5	1,8 / 1,23	1,74 / 1,5	1,83 / 1,29	1,59 / 1,46	0,83 / 0,67	2,33 / 1,15

Л – в литом состоянии; ТО – в термообработанном состоянии.

Согласно данным, представленным в табл. 2, в литом состоянии исследуемая сталь обладает максимальным значением коэффициента абразивной износостойкости ($> 2,0$ ед.) при содержании в ней хрома около 2,0%. При большем или меньшем содержании хрома этот коэффициент снижается на 15–20%. Такая тенденция характерна для всех экспериментальных образцов независимо от скорости охлаждения сплава в литейной форме, то есть типа формы, в которую залиты образцы.

Термическая обработка способствует снижению коэффициентов абразивной износостойкости экспериментальных образцов на 23–36%. Максимальное значение коэффициента (1,5 ед.) достигнуто на образце, залитом в сухую песчано-глинистую форму, с содержанием хрома 3,15%.

Значения коэффициентов износостойкости для образцов, залитых в сухую ПГФ, увеличиваются при увеличении концентрации хрома в составе стали. Для образцов, залитых в сырую ПГФ, происходит снижение значения коэффициентов износостойкости при достижении концентрации хрома более 2,0%. Аналогичная зависимость характерна для образцов, залитых в кокиль [11].

В литом состоянии коэффициент износостойкости определяется наличием вторичной фазы, её морфологией, а также расположением относительно зерна аустенита.

На коэффициент износостойкости в литом состоянии оказывают существенное влияние следующие факторы: размер зерна аустенита, его анизотропия (отношение длины к ширине), распределение химических элементов между аустенитом и избыточной фазой. Кроме того, в обоих случаях на износостойкость будет влиять микротвёрдость аустенита, которая меняется от степени легированности аустенита химическими элементами, изменяющейся в зависимости от скорости охлаждения расплава в литейной форме, а также состояния металла (литой, термообработанный).

При проведении исследований о влиянии легирования хромом, состояния отливки и типа формы на средний размер зерна аустенита, его анизотропию было установлено, что с увеличением концентрации хрома в составе стали Гадфильда происходит увели-

чение среднего размера зерна аустенита как в литом, так и термообработанном состояниях независимо от типа формы. При увеличении скорости охлаждения расплава в литейной форме (сырая ПГФ – сырая ПГФ – кокиль) наблюдается уменьшение среднего размера зерна в литом состоянии и после термической обработки.

По мере увеличения концентрации хрома в стали при одновременном увеличении скорости охлаждения сплава в литейной форме происходит увеличение рассматриваемого коэффициента анизотропии зерна аустенита, то есть увеличивается его «вытянутость» и в литом, и в термообработанном состояниях.

С увеличением количества хрома в стали и скорости охлаждения сплава в период кристаллизации анизотропия (вытянутость) зёрен увеличивается. После термической обработки зёрна приобретают более округлые формы, что отражается в уменьшении коэффициента анизотропии.

Максимальное значение коэффициента анизотропии наблюдается при содержании хрома порядка 2,0%. При этом же содержании хрома наблюдается качественная смена характера влияния скорости охлаждения на его величину. При концентрации хрома менее 2,0% увеличение скорости охлаждения сплава в форме способствует снижению значения коэффициента анизотропии, а при содержании хрома более 2,0% наблюдается противоположная картина. Следует отметить, что установленная тенденция прослеживается для литого и термообработанного состояний [11].

Легирование азотированным феррохромом приводит к изменению микротвёрдости аустенита и твёрдости экспериментальных отливок. При проведении исследований было определено, что при увеличении концентрации хрома микротвёрдость аустенита в литом состоянии увеличивается в среднем на 8%, в термообработанном – на 17%. Следует отметить, что среднее значение микротвёрдости аустенита как в литом, так и термообработанном состоянии, повышается по мере увеличения скорости его охлаждения в литейной форме. Это обусловлено увеличением степени легированности аустенита хромом и марганцем, что, в свою очередь, приводит к уменьшению кар-

бидной фазы [12, 13]. При этом значение твёрдости стали колеблется в пределах от 84 до 90 HRB.

В результате изучения поверхности после различных видов изнашивания – абразивного и ударно-абразивного – установлено, что при контакте абразива с поверхностью стали начинают протекать превращения по механизмам деформационного двойникования или дислокационного скольжения. Преимущественная ориентация деформационных двойников (рис. 1, а) отличается в соседних зернах. Кроме того, в одном зерне аустенита может существовать несколько ориентаций. Помимо двойников, на рис. 1, а представлены включения вторичной фазы (карбиды марганца и хрома) размеров от 0,5 до 3 мкм.

В процессе абразивного изнашивания карбиды хрома вырывает из аустенита, в то время как карбиды марганца раздробливает (рис. 1, б). В процессе ударно-абразивного изнашивания также наблюдается выкрашивание включений марганца.

После углубленного изучения поверхности экспериментальных образцов, сформировавшейся после ударно-абразивного изнашивания, было обнаружено, что она сочетает в себе различные виды структур, сменяющих друг друга и образуя при этом упрочнённый слой. Первый слой, который контактирует с абразивом, ультрамелкозернистый, то есть имеет пара-

метры наноструктуры (рис. 2, а). Далее следует сильно уплотнённый слой деформационного двойникования. За ним располагается слой мартенсита, имеющего характерное игольчатое строение. Эти два слоя чередуются, образуя слоистую структуру, в которой находится от 2 до 5 каждого из слоёв. Следует отметить, что мартенситное превращение протекает с увеличением удельного объёма стали, что способствует сжатию соседних, более податливых областей сплава. Это обуславливает наличие в изношенной поверхности слоёв деформационных двойников с сильным уплотнением. Заканчивается упрочнённый слой областью деформационных двойников с нормальным уплотнением (рис. 2, б).

Заключение

1. Экспериментальным путём установили, что максимальным значением коэффициента износостойкости обладает сталь с содержанием хрома порядка 2,0%.
2. По мере увеличения количества хрома в химическом составе стали происходит увеличение общего количества карбидов в структуре сплава в литом состоянии при одновременном уменьшении доли карбидов марганца и увеличении карбидов хрома.

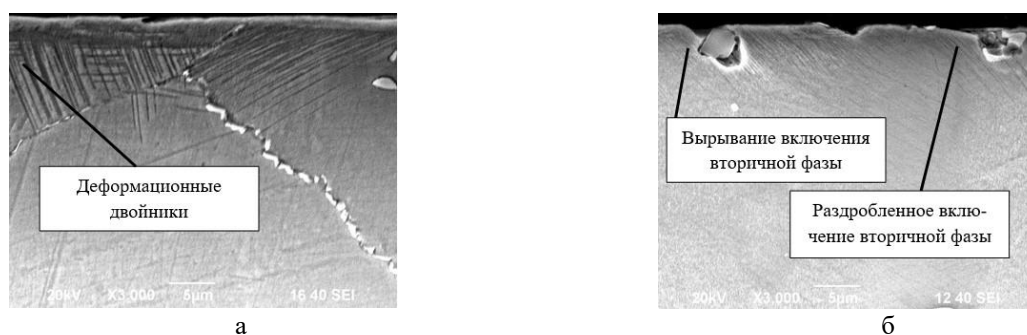


Рис. 1. Микроструктура поверхности износа высокомарганцевой стали в литом состоянии:

а – деформационные двойники; б – включения вторичной фазы

Fig. 1. Microstructure of the wear surface of high-manganese steel in the as-cast condition: a is deformation twins; b is secondary-phase inclusions

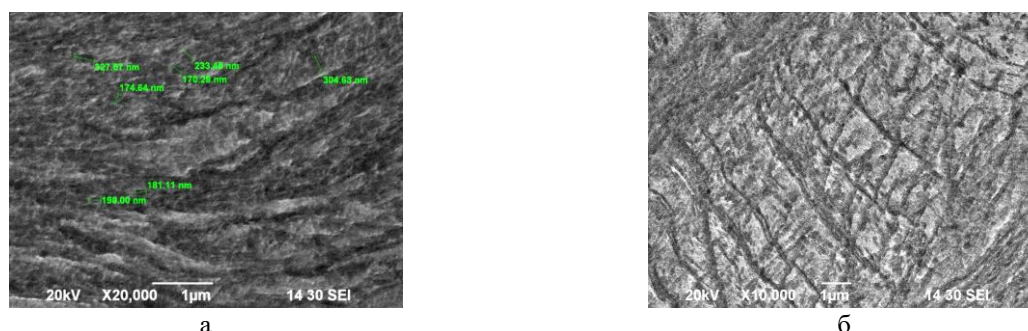


Рис. 2. Структурные области в поверхности, сформировавшейся в процессе ударно-абразивного изнашивания:

а – область ультрамелкого зерна; б – деформационные двойники с нормальным уплотнением

Fig. 2. Structural regions on the surface formed during impact-abrasive wear: a is ultrafine-grained region; b is deformation twins with normal compaction

3. Установлено влияние хрома и скорости охлаждения на анизотропию зерна. При концентрации хрома в химическом составе высокомарганцевой стали около 2,0% происходит качественная смена характера влияния скорости охлаждения сплава в литейной форме на коэффициент анизотропии зерна аустенита.

4. Максимальным значением микротвёрдости обладает высокомарганцевая сталь с содержанием хрома 2,0%.

5. В процессе абразивного изнашивания высокомарганцевой стали протекают деформационные превращения, в результате чего образуется упрочнённый слой.

6. В процессе ударно-абразивного изнашивания наблюдается образование упрочнённого слоя, включающего в себя область ультрамелкого зерна, область деформационных двойников с сильным и нормальным уплотнением, область мартенсита.

Список источников

1. Исследование влияния химического состава стали 110Г13Л на её свойства / Н.И. Бедрин, В.И. Стадничук, А.В. Стадничук и др. // Литейные процессы. 2003. № 3. С. 36–42.
2. Давыдов Н.Г., Благих Б.М., Бигеев А.М. К вопросу повышения качества отливок из высокомарганцевой стали 110Г13Л. Томск: Издательство Томского университета, 1972. 139 с.
3. Давыдов Н.Г. Высокомарганцевая сталь. М.: Металлургия, 1979. 176 с.
4. Колокольцев В.М., Долгополова Л.Б., Мулявко Н.М. Влияние химического состава на структуру и свойства хромомарганцевых аустенитных сталей // Литейные процессы. 2003. № 3. С. 31–36.
5. Федосеев С.Н., Шарафутдинова А.С. Изменение сталеного слитка модифицированием структуры // Актуальные проблемы современного машиностроения: сборник трудов Международной научно-практической конференции. Томск, 2014. С. 355–357.
6. Зыкова А.П., Федосеев С.Н., Лычагин Д.В. Модифицирование стали 110Г13Л // Современные проблемы машиностроения: сборник научных трудов VII Международной научно-технической конференции. 2013. С. 86–90.
7. Обработка стали 110Г13Л барий-стронциевыми карбонатами / В.А. Розум, С.П. Задруцкий, А.П. Беженко и др. // Литые и металлургия. 2010. № 4. С. 89–94.
8. Изучение влияния скорости охлаждения на механические и эксплуатационные свойства стали 110Г13Л / Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Горленко Д.А., Хренов И.Б., Дерябин Д.А. // Литейщик России. 2015. № 12. С. 23–24.
9. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Gorlenko D.A. Influence of the packing-defect energy on the abrasive wear resistance of Fe-12Mn-1.2C steel casting cooled at different rates // Steel in Translation. 2016, vol. 46, no. 9, pp. 614–619. DOI: 10.3103/S0967091216090138.
10. Calculation of stacking fault energy and its influence on abrasive wear resistance of Hadfield cast steel cooled at different rates / Kolokoltsev V.M., Vdovin K.N., Gorlenko D.A., Gulina A.E. // CIS Iron and Steel Review. 2016, no. 11, pp. 35–39. DOI: <http://dx.doi.org/10.17580/cisirs.2016.01.06>.
11. Исследование механических и эксплуатационных свойств высокомарганцевой стали, легированной азотированным феррохромом / Колокольцев В.М., Вдовин К.Н., Чернов В.П., Феоктистов Н.А., Горленко Д.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. № 3. С. 46–54.
12. Vdovin K.N., Gorlenko D.A., Feoktistov N.A. Characteristics of excess phase in cast high-manganese steel // Steel in Translation. 2016, vol. 46, no. 7, pp. 484–488. DOI: 10.3103/S0967091216070159.
13. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Gorlenko D.A. The Effect of the Cast high-manganese steel primary structure on its properties // Materials Science Forum. vol. 870, pp. 339–344. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.339.

References

1. Bedrin N.I., Stadnichuk V.I., Stadnichuk A.V., et al. Study of the effect of the chemical composition of 110G13L steel on its properties. *Liteyny protsessy* [Foundry Processes]. 2003;(3):36-42. (In Russ.)
2. Davydov N.G., Blagikh B.M., Bigeev A.M. *K voprosu povysheniya kachestva otlivok iz vysokomargantsevoi stali 110G13L* [On improving the quality of castings made of high-manganese 110G13L steel]. Tomsk: Tomsk University Publishing House, 1972, 139 p. (In Russ.)
3. Davydov N.G. *Vysokomargantsevaya stal* [High-Manganese Steel]. Moscow: Metallurgiya, 1979, 176 p. (In Russ.)
4. Kolokoltsev V.M., Dolgoplova L.B., Mulyavko N.M. Effect of chemical composition on the structure and properties of chromium-manganese austenitic steels. *Liteyny protsessy* [Foundry Processes]. 2003;(3):31-36. (In Russ.)
5. Fedoseev S.N., Sharafutdinova A.S. Modification of a steel ingot by modifying its structure. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktualnye problemy sovremennogo mashinostroeniya»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Current Problems of Modern Mechanical Engineering"]. 2014, pp. 355-357. (In Russ.)
6. Zykova A.P., Fedoseev S.N., Lychagin D.V. Modification of 110G13L steel. *Sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sovremennye problemy mashinostroeniya»* [Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference "Current Problems of Mechanical Engineering"]. 2013, pp. 86-90. (In Russ.)
7. Rozum V.A., Zadrutskiy S.P., Bezhenok A.P., et al. Treatment of 110G13L steel with barium-strontium carbonates. *Lite i metallurgiya* [Foundry and metallurgy]. 2010;(4):89-94. (In Russ.)
8. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Gorlenko D.A., Khrenov I.B., Deryabin D.A. Study of the effect of cooling rate on the mechanical and operational properties of 110G13L steel. *Liteyshchik Rossii* [Foundryman of Russia]. 2015;(12):23-24. (In Russ.)
9. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Gorlenko D.A. Influence of the packing-defect energy on the abrasive wear resistance of Fe-12Mn-1.2C steel casting cooled at different rates. *Steel in Translation*. 2016;46 (9):614-619. DOI: 10.3103/S0967091216090138.

10. Kolokoltsev V.M., Vdovin K.N., Gorlenko D.A., Gulina A.E. Calculation of stacking fault energy and its influence on abrasive wear resistance of Hadfield cast steel cooled at different rates. CIS Iron and Steel Review. 2016;(11):35-39. DOI: 10.17580/cisir.2016.01.06.
11. Kolokoltsev V.M., Vdovin K.N., Chernov V.P., Feoktistov N.A., Gorlenko D.A. Study of the mechanical and operational properties of high-manganese steel alloyed with nitrided ferrochrome. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016;(3):46-54. (In Russ.)
12. Vdovin K.N., Gorlenko D.A., Feoktistov N.A. Characteristics of excess phase in cast high-manganese steel. Steel in Translation. 2016;46(7):484-488. DOI: 10.3103/S0967091216070159.
13. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Gorlenko D.A. The effect of the cast high-manganese steel primary structure on its properties. Materials Science Forum. 2017;870:339-344. Doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.870.339.

Поступила 31.08.2026; принята к публикации 21.09.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 31/08/2026; revised 21/09/2026; published 30/09/2026

Феоктистов Николай Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой литейных процессов и материаловедения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: fna87@mail.ru. ORCID 0000-0002-6091-7983

Савинов Александр Сергеевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой механики, директор института металлургии, машиностроения и материалов обработки, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: savinov_nis@mail.ru. ORCID 0000-0001-7440-5404

Nikolay A. Feoktistov – PhD (Eng), Associate Professor, Head of the Department Casting Processes and Materials Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: fna87@mail.ru, ORCID 0000-0002-6091-7983

Aleksandr S. Savinov – DrSc. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Mechanics, Director of the Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Materials Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: savinov_nis@mail.ru. ORCID 0000-0001-7440-5404

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 539.213.2
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-100-107



СВЯЗЬ КОЭФФИЦИЕНТА ЗЕЕБЕКА С ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИЕЙ АМОРФНОЙ МАГНИТОМЯГКОЙ ЛЕНТЫ КЛАССА FINEMET

Чукин М.В., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю.

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

Аннотация. Целью работы является обоснование гипотезы о том, что коэффициент Зеебека возможно использовать в качестве показателя изменения внутренней энергии материала. В работе поставлена и решена задача выявления аналитической связи между коэффициентом Зеебека и изменением внутренней энергии аморфной магнитомягкой ленты путем совместного решения уравнений первого закона термодинамики для изохорного процесса, уравнений связи количества теплоты с температурой при нагревании или охлаждении и уравнения, формализующего эффект Зеебека. При выполнении расчетов и построении графических зависимостей использовались результаты, полученные экспериментально при измерении ТЭДС и определении коэффициентов Зеебека аморфной ленты с применением авторской методики. Эксперименты по нагреву и охлаждению исследуемых образцов аморфной ленты проводились на модуле PocketJaw комплекса Gleeble 3500 с использованием сборочного узла специально разработанной конструкции. Теоретически обосновано, что коэффициент Зеебека прямо пропорционален ТЭДС и обратно пропорционален единице без отношения изменений внутренних энергий холодного и горячего концов образца, а также температуре горячего конца образца. Показано, что коэффициент Зеебека характеризует отношение изменений внутренних энергий холодного и горячего концов образца при термическом воздействии и может быть использован в качестве структурно зависимого параметра, характеризующего начальное внутреннее энергетическое состояние аморфной ленты. Экспериментально подтверждено, что прямой зависимости между коэффициентом Зеебека и изменением внутренней энергии не наблюдается. Доказана возможность использования метода определения и анализа коэффициентов Зеебека, характеризующего начальное внутреннее энергетическое состояние поверхностей аморфной ленты.

Ключевые слова: аморфная магнитомягкая лента класса Finemet, термоэлектродвижущая сила, коэффициент Зеебека, изменение внутренней энергии, термическое воздействие

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России (проект FZRU-2025-0003).

© Чукин М.В., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., 2026

Для цитирования

Чукин М.В., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю. Связь коэффициента Зеебека с внутренней энергией аморфной магнитомягкой ленты класса Finemet // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 100-107. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-100-107>



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

RELATIONSHIP BETWEEN THE SEEBECK COEFFICIENT AND THE INTERNAL ENERGY OF THE FINEMET-CLASS AMORPHOUS SOFT MAGNETIC RIBBON

Chukin M.V., Koptseva N.V., Efimova Yu.Y.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The aim of this study is to substantiate the hypothesis that the Seebeck coefficient can be used as an indicator of changes in the internal energy of a material. The study formulates and solves the problem of determining an analytical relationship between the Seebeck coefficient and the change in internal energy of an amorphous soft magnetic ribbon by jointly solving the equations of the first law of thermodynamics for an isochoric process, the equations relating the amount of heat to temperature during heating or cooling, and the equation formalizing the Seebeck effect. The calculations and graphical relationships have been based on experimental results obtained by measuring the thermal electromotive force (TEMF) and determining the Seebeck coefficients of an amorphous ribbon using the authors' methodology. Heating and cooling experiments on the investigated amorphous ribbon specimens have been performed using the PocketJaw module of the Gleeble 3500 system with a specially designed assembly. It has been theoretically substantiated that the Seebeck coefficient is directly proportional to the TEMF and inversely proportional to unity minus the ratio of the changes in the internal energies of the cold and hot ends of the specimen, as well as to the temperature of the hot end of the specimen. It has been shown that the Seebeck coefficient characterizes the ratio of changes in the internal energies of the cold and hot ends of the specimen under thermal exposure and can be used as a structure-dependent parameter characterizing the initial internal energy state of an amorphous ribbon. It has been experimentally confirmed that there is no direct dependence between the Seebeck coefficient and the change in internal energy. The possibility of using the method for determining and analyzing Seebeck coefficients to characterize the initial internal energy state of the surfaces of an amorphous ribbon has been demonstrated.

Keywords: Finemet-class amorphous soft magnetic ribbon, thermal electromotive force, Seebeck coefficient, change in internal energy, thermal exposure.

The work was supported financially by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FZRU-2025-0003).

For citation

Chukin M.V., Koptseva N.V., Efimova Yu.Y. Relationship Between the Seebeck Coefficient and the Internal Energy of the Finemet-Class Amorphous Soft Magnetic Ribbon. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 100-107. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-100-107>

Введение

Аморфные металлы отличаются от кристаллических отсутствием строгой периодической упорядоченности атомов. Однако аморфность не означает полное хаотическое распределение атомов, а подразумевает лишь отсутствие дальнего периодического порядка. Локальная координация атомов, аналогичная кристаллической структуре, сохраняется, поэтому аморфные вещества характеризуются короткодействующим порядком (короткодействующей координацией) [1-4]. Именно с короткодействующим и среднечисленным порядком, а не с дальнедействующей периодичностью тесно связаны физические свойства аморфных материалов.

Продуктом метода быстрой закалки является сверхтонкая лента, используемая для производства, например, магнитопроводов высокочастотных устройств [5-7]. Важно, что аморфные ленты из материала типа Finemet на основе железа имеют состав, позволяющий получить нанокристаллическое состояние путем термической обработки в определенном интервале температур [8-10]. Сплавы с такой структурой

обладают существенно лучшим сочетанием магнитных свойств по сравнению с аморфным состоянием: высокой магнитной проницаемостью μ , низкой коэрцитивной силой H_C , повышенной индукцией B_S [11-13]. На производстве, чтобы произвести готовую продукцию из нанокристаллического материала, проводят отжиг уже собранного магнитопровода.

Разупорядоченная структура аморфного материала определяет его избыточную энергию Гиббса в сравнении с кристаллическим состоянием. Эта избыточная энергия представляет собой термодинамическую движущую силу для самопроизвольных атомных перестроек (структурной релаксации), которая значительно изменяет физические свойства аморфного материала [2, 14-16]. Механизм структурной релаксации тесно связан с активацией локальных атомных перестроек. В аморфных системах атомные позиции не фиксированы жестко, а характеризуются определенной вероятностью перехода между энергетическими минимумами локального потенциала. Эти переходы приводят к постепенному приближению конфигурации системы к состоянию с минимальной свободной энергией.

В ходе структурной релаксации уменьшается внутренняя и свободная энергия за счет приближения локальных структур к термодинамически более стабильным конфигурациям [2, 14]. Наблюдается изменение плотности и объема – материал обычно уплотняется из-за более эффективной упаковки атомов и может стать более пластичным или менее упругим в зависимости от направления релаксации.

Внутренняя энергия – это функция состояния системы, то есть ее величина зависит только от текущего состояния системы (температуры, объема, давления), а не от того, как система пришла в это состояние. В то же время хорошо известен эффект Зеебека, который заключается в возникновении в цепи из последовательно соединенных разнородных материалов разности электрических потенциалов – термоэлектродвижущей силы (ТЭДС) из-за того, что различные части системы (горячие и холодные концы) находятся при разных температурах. Это создает градиент химического потенциала, который и порождает электрическое поле. С позиции внутренней энергии в цепи происходит непрерывный обмен – часть внутренней энергии системы, например в виде тепловой, переходит в электрическую. При этом в самих материалах при прохождении тока будет меняться внутренняя энергия (например, за счет джоулева тепла), а результирующая ТЭДС показывает, какую работу по перемещению заряда можно получить в этой цепи. Таким образом, ТЭДС демонстрирует, как макроскопические параметры (разница температур) порождают электрический потенциал, который напрямую связан с распределением внутренней энергии (и энтропии) в системе [2, 17, 18]. В более общем виде второе начало термодинамики утверждает, что в изолированной системе энтропия стремится к максимуму, а ТЭДС как раз показывает, как эта тенденция реализуется через энергетические обмены [19].

В основе термоэлектрических эффектов лежат явления, возникающие при неравномерном распределении температуры в материале, а также при взаимодействии носителей заряда с кристаллической решеткой. Эти процессы весьма чувствительны к особенностям микроструктуры сплавов: электронному спектру, типу носителей тока и характеру их взаимодействия с ионной и магнитной подсистемами и т.п. [20]. Аморфные магнитомягкие сплавы переходных металлов являются в этом отношении чрезвычайно сложными системами. Поэтому с теоретической точки зрения задача описания зависимости ТЭДС от температуры и состава этих сплавов достаточно трудна и до настоящего времени не получила вполне адекватного решения.

Учитывая, что ТЭДС возникает из-за потока носителей заряда, направленного от более нагретой области к более холодной, который создается градиентом температуры, а внутренняя энергия материала влияет на подвижность носителей, то внутренняя энергия аморфных материалов косвенно влияет на ТЭДС через температурную зависимость процессов, связанных с переносом заряда и рассеянием носите-

лей в материале [21]. Результаты исследований по определению коэффициента Зеебека в различных аморфных магнитомягких материалах, выполненные авторами настоящей работы, позволили сделать предположение о существенной разнице энергетического состояния поверхностей аморфной ленты и степени протекания структурной релаксации при термическом воздействии.

Между внутренней энергией аморфных материалов и ТЭДС действительно существует связь, но она опосредованная и сложная, так как зависит от множества факторов: структуры материала, механизмов рассеяния носителей заряда, температурных условий и других параметров. Бесспорно, структура аморфного материала сильно влияет на его ТЭДС. Главная особенность таких материалов в том, что у них нет дальнего порядка в расположении атомов – сохраняется только ближний порядок, то есть ближайшее окружение каждого атома довольно хаотично, но координационное число, как у соответствующего кристалла, остается. Это сказывается на рассеянии носителей заряда. Поверхность Ферми в таких сплавах размыта, что напрямую меняет коэффициент Зеебека (удельную ТЭДС). Именно эта локальная неупорядоченность и запускает особые механизмы, изменяющие ТЭДС. Кроме того, при кристаллизации аморфных материалов образуются кристаллиты, что приводит к появлению межфазных границ и изменению электропроводности и ТЭДС [22]. И, наконец, ТЭДС возникает из-за потока носителей заряда, который создается градиентом температуры, а внутренняя энергия материала влияет на подвижность носителей. Прямая связь внутренней энергии и ТЭДС проявляется через температурную зависимость: с ростом температуры увеличивается средняя энергия носителей заряда, что усиливает градиент концентрации носителей заряда вдоль материала и приводит к росту ТЭДС [20, 23]. Поэтому представляет интерес исследование влияния разности температур в цепи на внутреннюю энергию и ТЭДС.

Необходимо учитывать, что исследование внутренней энергии представляет собой целый комплекс подходов: от простых опытов до сложных теоретических моделей. Абсолютное значение внутренней энергии в большинстве случаев измерить напрямую невозможно – определяют только ее изменение. Неопределенность устраняется выбором стандартного состояния за начало отсчета [2]. Часто прибегают к косвенным измерениям, при которых изменение внутренней энергии находят по результатам прямых измерений других величин (температуры, давления, объема, количества теплоты и работы). Помимо экспериментальных наблюдений используют наглядные опыты, демонстрирующие, как меняется внутренняя энергия. Применяют комбинацию методов: сочетают калориметрию с термодинамическими расчетами или статистическими методами.

Результаты исследований, выполненных авторами с применением оригинальной методики измерения ТЭДС с определением значений коэффициентов Зеебека, показали хорошее согласование с известными

из литературных источников данными других исследователей, что позволило авторам сделать заключение о возможности использования наряду с другими методами испытания аморфных материалов измерения ТЭДС, и коэффициентов Зеебека в качестве структурно-зависимых параметров, характеризующих энергетическое состояние поверхностей аморфной ленты и протекание структурной релаксации. В связи с вышесказанным целью данной работы является обоснование гипотезы, что коэффициент Зеебека возможно использовать в качестве показателя изменения внутренней энергии материала.

Методика исследований

Для достижения поставленной цели была поставлена и решена задача выявления аналитической связи этих параметров путем совместного решения уравнений первого закона термодинамики для изохорного процесса, уравнений связи количества теплоты с температурой при нагревании или охлаждении и уравнения, формализующего эффект Зеебека. При выполнении расчетов и построении графических зависимостей использовались результаты, полученные экспериментально при измерении ТЭДС и определении коэффициентов Зеебека аморфной ленты с применением авторской методики, подробно рассмотренной в работах [24–26]. Эксперименты по нагреву и охлаждению исследуемых образцов проводились на модуле PocketJaw комплекса Gleeble 3500 с использованием сборочного узла специально разработанной конструкции*. В качестве образцов использовались мерные отрезки быстрозакаленной аморфной ленты из сплава типа «Finemet» (5БДСР) шириной 20 мм и длиной 60 ± 1 мм. Исследованию подвергалась контактная (прилегающая к вращающемуся медному диску при разливке) и свободная (затвердевающая без физического воздействия диска) поверхности. В ходе экспериментов для контактной и свободной поверхностей при термических циклах нагрева и охлаждения на каждом из образцов ленты были определены максимальные достигаемые температуры горячего конца образцов ($TC2$, °C), текущие значения ТЭДС (E , мкВ) и коэффициенты Зеебека (K_z , мкВ/°C), методика определения которого приведена в работе [20].

На рис. 1 приведена схема расположения выделенных в образце аморфной ленты элементарных объемов в горячих и холодных концах с указанием точек крепления термопар $TC2$ и $TC3$ применительно к условиям проведенных экспериментов.

Выделенные элементарные объемы имеют одинаковые геометрические размеры и объемы, имеют одинаковую массу m и в пределах длины исследуемого образца – одинаковую удельную теплоемкость c . Тогда количество теплоты для этих элементарных объемов, находящихся в горячем (θ_r) и холодном (θ_x) концах образца, определяются соответственно как

$$\theta_r = cm(TC2_i - TC2_0), \quad (1)$$

* Эксперименты на комплексе Gleeble 3500 проходили при участии лаборанта-исследователя Потапова И.М.

$$\theta_x = cm(TC3_i - TC3_0), \quad (2)$$

где $TC2_i$, $TC3_i$ – текущие значения температур в выделенных элементарных объемах горячего и холодного концов образца соответственно, а $TC2_0$, $TC3_0$ – начальные значения температур в этих элементарных объемах.

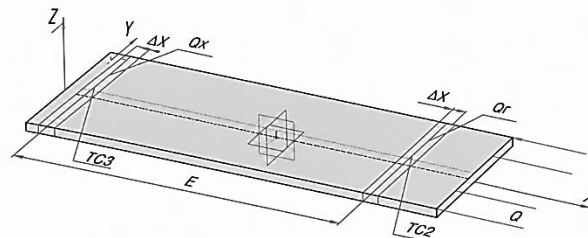


Рис. 1. Схема расположения выделенных элементарных объемов в холодных и горячих концах исследуемого образца аморфной ленты с точками крепления термопар

Fig. 1. Schematic arrangement of the selected elementary volumes at the cold and hot ends of the investigated amorphous ribbon specimen with thermocouple attachment points

Разделив уравнение (2) на (1), получим

$$\frac{\theta_x}{\theta_r} = \frac{TC3_i - TC3_0}{TC2_i - TC2_0}. \quad (3)$$

При условии, что начальные значения температур горячего и холодного концов одинаковы, то есть $TC2_0 = TC3_0$, и выбираются за нулевую точку отсчета, уравнение (3) упростится и примет вид

$$\frac{\theta_x}{\theta_r} \approx \frac{TC3_i}{TC2_i}. \quad (4)$$

С другой стороны, формализованная запись эффекта Зеебека представляет собой уравнение вида

$$E = K_z(TC2_i - TC3_i), \quad (5)$$

или

$$\frac{E}{K_z} = TC2_i - TC3_i, \quad (6)$$

где E – текущее значение ТЭДС.

После деления обеих частей уравнения (6) на $TC2_i$ получим

$$\frac{E}{K_z TC2_i} = 1 - \frac{TC3_i}{TC2_i} \quad (7)$$

или

$$\frac{TC3_i}{TC2_i} = 1 - \frac{E}{K_z TC2_i}. \quad (8)$$

При подстановке (8) в (4) после простейших преобразований получим

$$\frac{E}{K_z TC2_i} \approx 1 - \frac{\theta_x}{\theta_r}. \quad (9)$$

С другой стороны, согласно первому закону термодинамики, связь количества теплоты с изменением внутренней энергии определяется уравнением

$$\theta = \Delta U + A, \quad (10)$$

где ΔU – изменение внутренней энергии системы; A – работа, совершенная системой на преодоление внешних сил.

Для рассматриваемого изохорного примера, принятого в качестве допущения в условиях отсутствия внешних сил на систему, когда $A \approx 0$ при переходе к выделенным единичным объемам $\theta_{\Gamma} = \Delta U_{\Gamma}$ и $\theta_x = \Delta U_x$, тогда

$$\frac{\theta_x}{\theta_{\Gamma}} = \frac{\Delta U_x}{\Delta U_{\Gamma}}. \quad (11)$$

Окончательно при подстановке (11) в (9) после преобразований получим

$$\frac{E}{K_z} = TC2_i \left(1 - \frac{\Delta U_x}{\Delta U_{\Gamma}} \right), \quad (12)$$

$$K_z = \frac{E}{TC2_i \left(1 - \frac{\Delta U_x}{\Delta U_{\Gamma}} \right)}. \quad (13)$$

Уравнения (12) и (13) являются разной формой записи связи коэффициента Зеебека с изменением внутренней энергии системы, причем в (12) левая и правая части уравнения измеряются в °С, а в (13) единицы измерения соответствуют единицам измерения коэффициента Зеебека, то есть мкВ/°С. В безразмерных единицах измерения форма записи (12) и (13) может быть представлена в виде

$$\frac{E}{K_z TC2_i} = 1 - \frac{\Delta U_x}{\Delta U_{\Gamma}} \text{ или } \frac{\Delta U_x}{\Delta U_{\Gamma}} = 1 - \frac{E}{K_z TC2_i}. \quad (14)$$

Полученные результаты и их обсуждение

Анализируя полученные уравнения (13) и (14), следует отметить, что при значениях $TC2_i = 0$ знаменатели этих уравнений обращаются в ноль. Это имеет безусловный физический смысл, подтверждающий отсутствие возникновения ТЭДС.

Отношения изменений внутренней энергии холодных и горячих концов образцов аморфной ленты $\frac{\Delta U_x}{\Delta U_{\Gamma}}$ входят в уравнение (11) первого закона термодинамики для изохорного процесса и в уравнение, формализующее эффект Зеебека (14). Были построены кривые изменения этих отношений в зависимости от значений температуры $TC2_i$ при разных значениях коэффициента Зеебека, которые приведены на **рис. 2**. На этом же графике приведены зависимости изменения отношений изменений температур $\frac{TC3_i}{TC2_i}$. При построении экспериментально-теоретических кривых значения E и $TC2_i$ были взяты из массивов экспериментальных данных, а

величину K_z определяли из уравнения прямой при аппроксимации зависимости ТЭДС от изменения температур $\Delta T_i = TC2_i - TC3_i$.

Из **рис. 2** видно, что эти отношения с повышением температуры нагрева монотонно снижаются. При этом для всех исследуемых образцов с различными коэффициентами Зеебека по обеим поверхностям наблюдается совпадение кривых $\frac{TC3_i}{TC2_i}$ при изменении температуры

$TC2_i$, что свидетельствует о постоянстве термических условий воздействия на образцы и отсутствии их влияния на ТЭДС. Однако в то же самое время расположение кривых $\frac{\Delta U_x}{\Delta U_{\Gamma}}$ при изменении температуры $TC2_i$ для

разных значений коэффициента Зеебека существенно различается. Сдвиг кривых вниз на графике свидетельствует об уменьшении значений $\frac{\Delta U_x}{\Delta U_{\Gamma}}$, что возможно

при увеличении ΔU_{Γ} , причем

$$\Delta U_{\Gamma} = U_{\Gamma i} - U_{\Gamma 0}, \quad (15)$$

где $U_{\Gamma i}$ – текущее значение внутренней энергии горячего конца образца; $U_{\Gamma 0}$ – начальная внутренняя энергия горячего конца образца.

Тогда при условно постоянном ΔU_x из уравнения (15), несомненно, следует, что увеличение ΔU_{Γ} может быть связано либо с более высоким начальным уровнем внутренней энергии $U_{\Gamma 0}$, либо с понижением текущего значения внутренней энергии $U_{\Gamma i}$ при термическом воздействии, характеризуемом величиной температуры $TC2_i$. Поскольку для исследуемых образцов при постоянных термических условиях ожидать существенную разницу текущих значений внутренней энергии для выделенных элементарных объемов едва ли возможно, то будет верно предположение, что изменение значений коэффициентов Зеебека характеризует изменение начального уровня значений внутренней энергии аморфного материала $U_{\Gamma 0}$. При этом чем выше находится кривая на графике, тем больше изменения энергетического уровня горячего конца образца ΔU_{Γ} для этой кривой. Другими словами, различное положение кривых $\frac{\Delta U_x}{\Delta U_{\Gamma}}$ связано с различным

исходным энергетическим состоянием материала $U_{\Gamma 0}$. Связь коэффициента Зеебека с изменением внутренней энергии при термическом воздействии на быстрозакаленную аморфную ленту может быть проиллюстрирована зависимостью, приведенной на **рис. 3**. Для примера на этом рисунке представлены кривые изменения усредненных значений коэффициентов Зеебека в зависимости от отношения изменений внутренних энергий холодных и горячих концов образцов аморфной ленты $\frac{\Delta U_x}{\Delta U_{\Gamma}}$ для свободной и контактной поверхностей при температуре $TC2_i = 100^{\circ}\text{C}$.

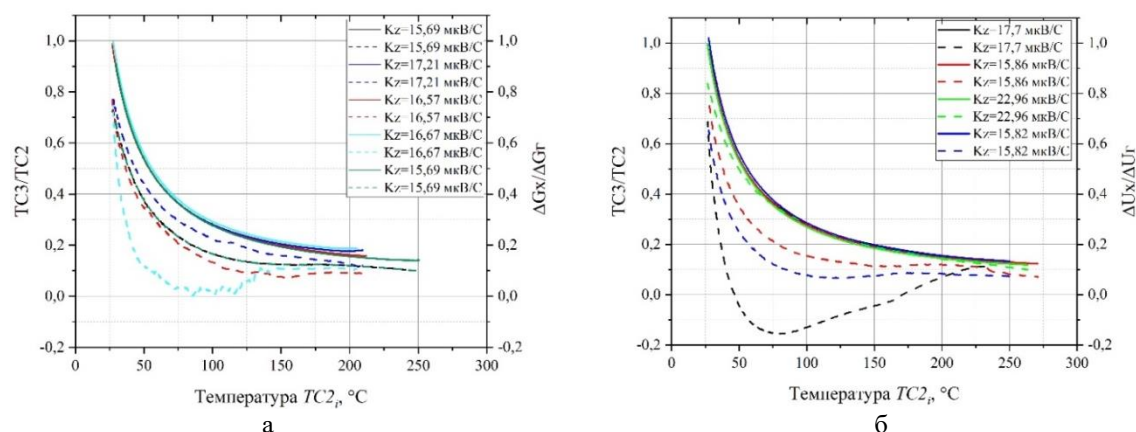


Рис. 2. Изменение отношений температур $\frac{TC3_i}{TC2_i}$ (сплошные линии) и внутренних энергий холодных и горячих концов образцов аморфной ленты $\frac{\Delta U_x}{\Delta U_g}$ (пунктирные линии) в зависимости от температуры $TC2_i$ для свободной (а) и контактной (б) поверхностей аморфной ленты при разных значениях коэффициента Зеебека

Fig. 2. Changes in the ratios of temperature $\frac{TC3_i}{TC2_i}$ (solid lines) and the internal energies of the cold and hot ends of the amorphous ribbon specimens $\frac{\Delta U_x}{\Delta U_g}$ (dashed lines) depending on the temperature $TC2_i$ for the free (a) and contact (б) surfaces of the amorphous ribbon at different Seebeck coefficient values

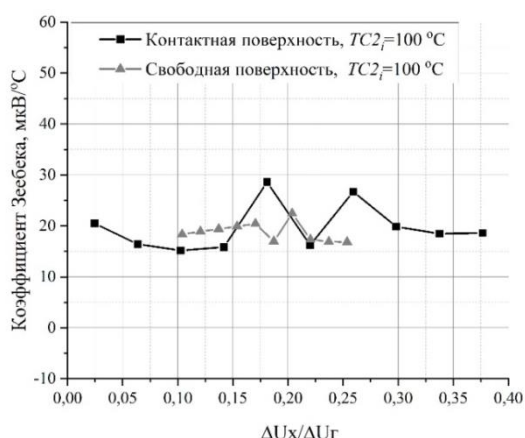


Рис. 3. Изменение усредненных значений коэффициентов Зеебека в зависимости от отношения изменений внутренних энергий холодных и горячих концов образцов аморфной ленты $\frac{\Delta U_x}{\Delta U_g}$ для свободной и контактной поверхностей при температуре $TC2_i = 100^\circ\text{C}$

Fig. 3. Changes in the average Seebeck coefficient values depending on the ratio of changes in the internal energies of the cold and hot ends of the amorphous ribbon specimens $\frac{\Delta U_x}{\Delta U_g}$ for the free and contact surfaces at a temperature of $TC2_i = 100^\circ\text{C}$

Как следует из рис. 3, при одинаковых температурах $TC2_i$ для контактной поверхности наблюдаются пиковые значения коэффициентов Зеебека, равные 28,6 и

26,7 мкВ/°С, соответствующие значениям $\frac{\Delta U_x}{\Delta U_g} = 0,18$

и 0,26. Среднее значение K_z для этой поверхности (без учета пиковых значений) составляет 17,84 мкВ/°С. Для свободной поверхности наблюдается один пик значения коэффициента Зеебека (22,4 мкВ/°С), приходящийся на отношение изменений внутренних энергий холодных и горячих концов образцов, равных 0,204. Это означает, что при условии одинакового термического воздействия на образцы значения K_z зависят исключительно от энергетического состояния аморфной ленты, которое можно характеризовать отношением $\frac{\Delta U_x}{\Delta U_g}$.

Однако прямой зависимости между коэффициентом Зеебека и изменением внутренней энергии, как и следовало ожидать, не наблюдается, что и отмечается в научной литературе.

Закключение

1. Теоретически обосновано, что коэффициент Зеебека прямо пропорционален ТЭДС и обратно пропорционален единице без отношения изменений внутренних энергий холодного и горячего концов образца, а также температуре горячего конца образца.

2. Показано, что коэффициент Зеебека характеризует отношение изменений внутренних энергий холодного и горячего концов образца при термическом воздействии и может быть использован в качестве структурно-зависимого параметра, характеризующего начальное внутреннее энергетическое состояние аморфной ленты.

3. Экспериментально подтверждено, что прямой зависимости между коэффициентом Зеебека и изменением внутренней энергии не наблюдается.

4. Доказана возможность использования метода определения и анализа коэффициентов Зеебека, характеризующего начальное внутреннее энергетическое состояние поверхностей аморфной ленты.

Список источников

1. Гиннэ С.В. Аморфные металлические материалы: закономерности и условия аморфизации // Эпоха науки. 2025. №41. С. 25-32.
2. Saturated magnetization and glass forming ability of soft magnetic Fe-based metallic glasses / B. Huang, Y. Yang, A. D. Wang et. al. // Intermetallics. 2017, vol. 84, pp. 74-81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.intermet.2017.01.003>
3. Стародубцев Ю.Н., Белозеров В.Я. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2002. 366 с.
4. Дилатометрический анализ процесса нанокристаллизации магнитомягкого сплава Fe_{72.5}Cu₁Nb₂Mo_{1.5}Si₁₄B₉ / С. Цепелев, Ю. Н. Стародубцев, В. А. Зеленин и др. // Физика металлов и металловедение. 2017. Т. 118. № 6. С. 584-588.
5. Optimization of crystallization, microstructure and soft magnetic properties of Fe-B-Cu alloys by rapid cyclic annealing / X. B. Zhai, L. Zhu, H. Zheng et. al. // Journal of Alloys and Compounds. 2018, vol. 768, is. 5, pp. 591-597. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.07.272.
6. Yoshizawa Y., Yamauchi K. Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure // Materials Transactions. 1990, vol. 31, pp. 307-314. <https://doi.org/10.2320/matertrans1989.31.307>
7. Herzer G. Nanocrystalline soft magnetic alloys // Handbook of magnetic materials. 1997, vol. 10, pp. 415-462. DOI: 10.1016/S1567-2719(97)10007-5.
8. New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure / Y. Yoshizawa, S. Oguma, K. Yamauchi // Journal of applied Physics. 1988, vol. 64, pp. 6044-6046. DOI: 10.1063/1.342149
9. Zhu L. Modulating the crystallization process of Fe₈₂B₁₂C₆ amorphous alloy via rapid annealing // Journal of alloys and compounds. 2019, vol. 785, is. 5, pp. 328-334. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.01.209
10. Хоник В.А. Структурная релаксация и обусловленное ей пластическое течение металлических стекол ниже температуры стеклования: от феноменологического к микроскопическому пониманию // Вестник ТГУ. 2010. Т. 15. Вып. 3. С. 789.
11. Чен Х.С. Структурная релаксация в металлических стеклах // Аморфные металлические сплавы / под ред. Ф.Е. Люборского. М.: Металлургия, 1987. 584 с.
12. Крахмалев П.В. Структура и свойства магнитомягких аморфных сплавов на основе железа и кобальта при термической, механотермической и термомагнитной обработке: специальность 05.16.01. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 1999. 142 с.
13. Hodge I.M. Structural Relaxation. In: Classical Relaxation Phenomenology. Springer, Cham. 2019. P. 197-222. https://doi.org/10.1007/978-3-030-02459-8_11.
14. Structural Relaxation Made Simple/ E. Bitzek, P. Koskinen, F. Gähler, M. Moseler, P.Gumbsch // Physical review letters. 2006. 97. 170201. DOI: 10.1103/PhysRevLett.97.170201
15. Барышева Т.Б. Второе начало термодинамики и энтропия: методическое пособие / под ред. А.И. Черноуцана. М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2017. 32 с.
16. Новиков С.В. Термоэлектрические свойства нанокристаллических силицидов хрома и марганца: специальность 01.04.10 «Физика полупроводников»: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Санкт-Петербург, 2014. 168 с.
17. Петров А.Л., Гаврилюк А.А., Зубрицкий С.М. Структура и свойства неупорядоченных твердых тел: учебное пособие. Изд-во Иркутского государственного университета, 2004. 70 с.
18. ТермоЭДС в аморфных ферромагнитных сплавах / А.Д. Арсеньева, А.В. Ведяев, Р.П. Васильева и др. // Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия. 1991. № 3. С. 71-75.
19. Плотность электронных состояний и термоЭДС в углеродных нанотрубках с примесями и структурным беспорядком / Н.В. Мельникова, В.Е. Егорушкин, Н.Г. Бобенко и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 11. С. 24-34.
20. Чукин М.В., Ефимова Ю.Ю., Копцева Н.В. Определение неоднородности свойств холоднокатаной ленты по термоЭДС. Сообщение 1. Разработка методики исследования // Черные металлы. 2026. Февраль. С. 60-66.
21. Чукин М.В., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю. Определение неоднородности свойств холоднокатаной ленты по термоЭДС. Сообщение 2. Исследование связи между твердостью и термоЭДС // Черные металлы. 2026. № 3. С. 22-29.
22. Термоэлектрическая неразрушающая оценка остаточных напряжений в холоднокатаной стальной ленте / М.В. Чукин, Н.В. Копцева, Ю.Ю. Ефимова, А.Н. Шеметов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. № 1. С. 88-99.

References

1. Ginne S.V. Amorphous metallic materials: regularities and conditions of amorphization. *Epokha nauki* [Era of science]. 2025;(41):25-32. (In Russ.)
2. Huang B., Yang Y., Wang A.D. et al. Saturated magnetization and glass forming ability of soft magnetic Fe-based metallic glasses. *Intermetallics*. 2017;84:74-81. DOI: 10.1016/j.intermet.2017.01.003.
3. Starodubtsev Yu.N., Belozarov V.Ya. *Magnitnye svoystva amorfnykh i nanokristallicheskiy spлавov* [Magnetic properties of amorphous and nanocrystalline alloys]. Yekaterinburg: Ural University Publishing House, 2002, 366 p. (In Russ.)
4. Tsepelev S., Starodubtsev Yu.N., Zelenin V.A. et al. Dilatometric analysis of the nanocrystallization process of the Fe_{72.5}Cu₁Nb₂Mo_{1.5}Si₁₄B₉ soft magnetic alloy. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of metals and metallography]. 2017;118(6):584-588. (In Russ.)
5. Zhai X.B., Zhu L., Zheng H. et al. Optimization of crystallization, microstructure and soft magnetic properties of Fe-B-Cu alloys by rapid cyclic annealing. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;768(5):591-597. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.07.272.
6. Yoshizawa Y., Yamauchi K. Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure. *Materials Transactions*. 1990;31:307-314. DOI: 10.2320/matertrans1989.31.307.

7. Herzer G. Nanocrystalline soft magnetic alloys. Handbook of Magnetic Materials. 1997;10:415-462. DOI: 10.1016/S1567-2719(97)10007-5.
8. Yoshizawa Y., Oguma S., Yamauchi K. New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure. Journal of Applied Physics. 1988;64:6044-6046. DOI: 10.1063/1.342149.
9. Zhu L. Modulating the crystallization process of Fe₈₂B₁₂C₆ amorphous alloy via rapid annealing. Journal of Alloys and Compounds. 2019;785(5):328-334. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.01.209.
10. Khonik V.A. Structural relaxation and the resulting plastic flow of metallic glasses below the glass transition temperature: from phenomenological to microscopic understanding. Vestnik TGU [Vestnik of Tomsk State University]. 2010;15(3):789. (In Russ.)
11. Chen H.S. Structural relaxation in metallic glasses. Amorfnye metallicheskie splavy [Amorphous metallic alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 584 p. (In Russ.)
12. Krakhmalev P.V. Struktura i svoystva magnitomyagkikh amorfnykh splavov na osnove zheleza i kobalta pri termicheskoi, mekhanotermicheskoi i termomagnitnoi obrabotke: dis. kand. tekhnich. nauk [Structure and properties of soft magnetic amorphous iron- and cobalt-based alloys under thermal, thermomechanical and thermomagnetic treatment. Ph.D. dissertation]. Saint Petersburg, 1999. 142 p.
13. Hodge I.M. Structural Relaxation. In: Classical Relaxation Phenomenology. Springer, Cham, 2019, pp. 197–222. DOI: 10.1007/978-3-030-02459-8_11.
14. Bitzek E., Koskinen P., Gähler F., Moseler M., Gumbusch P. Structural Relaxation Made Simple. Physical Review Letters. 2006;97:170201. DOI: 10.1103/PhysRevLett.97.170201.
15. Barysheva T.B. Vtoroe nachalo termodinamiki i entropiya: Metodicheskoe posobie [The second law of thermodynamics and entropy: a methodological guide]. Ed. by Chernoutsan A.I. Moscow: Publishing Center of Gubkin University of Oil and Gas, 2017, 32 p. (In Russ.)
16. Novikov S.V. Termoelektricheskie svoystva nanokristallicheskikh silitsidov khroma i margantsa: dis. kand. fiz.-mat. nauk [Thermoelectric properties of nanocrystalline chromium and manganese silicides. Ph.D. dissertation]. Saint Petersburg, 2014, 168 p.
17. Petrov A.L., Gavriluk A.A., Zubritsky S.M. Struktura i svoystva neuporyadochennykh tverdykh tel: uchebnoe posobie [Structure and properties of disordered solids: textbook]. Irkutsk: Irkutsk State University Publishing House, 2004, 70 p. (In Russ.)
18. Arseneva A.D., Vedyayev A.V., Vasilyeva R.P. et al. Termoelektricheskie svoystva amorfnykh ferromagnitnykh splavakh [Thermoelectric power in amorphous ferromagnetic alloys]. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3. Fizika. Astronomiya [Vestnik of Moscow University. Series 3: Physics. Astronomy]. 1991;(3):71-75. (In Russ.)
19. Melnikova N.V., Egorushkin V.E., Bobenko N.G. et al. Density of electronic states and thermoelectric power in carbon nanotubes with impurities and structural disorder. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika [Russian Physics Journal]. 2012;55(11):24-34. (In Russ.)
20. Chukin M.V., Efimova Yu.Yu., Koptseva N.V. Determination of the heterogeneity of cold-rolled strip properties by thermoelectric power. Part 1. Development of a research methodology. Chernye metally [Ferrous Metals]. 2026;60-66. (In Russ.)
21. Chukin M.V., Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu. Determination of the heterogeneity of cold-rolled strip properties by thermoelectric power. Part 2. Investigation of the relationship between hardness and thermoelectric power. Chernye metally [Ferrous Metals]. 2026;(3):22-29. (In Russ.)
22. Chukin M.V., Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu. et al. Thermoelectric nondestructive assessment of residual stresses in cold-rolled steel strip. Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026; 24(1):88-99. (In Russ.)

Поступила 31.08.2026; принята к публикации 07.09.2026; опубликована 30.09.2026

Submitted 31/08/2026; revised 07/09/2026; published 30/09/2026

Чукин Михаил Витальевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: m.chukin@mail.ru. ORCID 0000-0003-0331-8105

Концева Наталья Васильевна – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: kopceva1948@mail.ru. ORCID 0000-0002-9749-0231

Ефимова Юлия Юрьевна – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: jefimova78@mail.ru ORCID 0000-0002-2729-8156

Mikhail V. Chukin – DrSc (Eng.), Chief Researcher,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: m.chukin@mail.ru. ORCID 0000-0003-0331-8105

Natalia V. Koptseva – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: kopceva1948@mail.ru. ORCID 0000-0002-9749-0231

Yuliya Yu. Efimova – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: jefimova78@mail.ru ORCID 0000-0002-2729-8156

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

PRODUCT QUALITY MANAGEMENT. STANDARDIZATION. INDUSTRIAL MANAGEMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 549:54.055
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-108-122



КОНЦЕПЦИЯ ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРИ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕМЕНТОВ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Тулупов О.Н.¹, Черяпкин А.Ф.², Наркевич М.Ю.¹, Логунова О.С.¹, Наркевич А.М.¹, Логунова П.С.¹

¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

²ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», Магнитогорск, Россия

Аннотация. Актуальность работы. Определяется современными требованиями к цифровизации инфраструктуры управления качеством элементов опасных производственных объектов для сокращения аварий и инцидентов. **Цель работы.** Цель исследования состоит в обосновании и разработке новой концепции цифровизации оценки качества элементов опасных производственных объектов. **Используемые методы.** При исследовании использованы методы системного анализа, в частности декомпозиции и обобщения при построении диаграмм по технологии стандарта IDEF0 и анализа нормативной базы управления промышленной безопасностью. **Новизна.** Построена новая концепция цифровизации в области промышленной безопасности при оценке качества управления и элементов опасных производственных объектов, отличающаяся использованием четырех основных положений: непротиворечивость, адаптивность, мультиплатформенность и обоснованность. Основу построения концепции составили новый менталитет структуры управления, вызов со стороны требований промышленной безопасности, устойчивая и гибкая система нормативной базы, устойчивая традиционная структура управления промышленной безопасностью и высокий уровень развития новых цифровых технологий. **Результаты.** Результаты исследования использованы при создании уникальной системы автоматизированного мониторинга технического состояния элементов металлургического предприятия в рамках выполнения научно-исследовательской работы. **Практическая значимость.** Разработанная система прошла опробование на платформе разработчика, при котором подтверждена работоспособность разработанной концепции. Концепция цифровизации при оценке качества элементов опасных производственных объектов направлена на создание цифровых систем нового поколения с элементами искусственного интеллекта для оценки качества элементов опасных производственных объектов.

Ключевые слова: опасные производственные объекты, цифровизация в оценке качества, новая концепция, непротиворечивость, адаптивность, мультиплатформенность и обоснованность

Работа выполнена при финансовой поддержке НИОКР по договору между ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» по теме «Разработка и применение методик контроля территории, зданий и сооружений ПАО «ММК» с использованием беспилотных воздушных судов (БВС)».

© Тулупов О.Н., Черяпкин А.Ф., Наркевич М.Ю., Логунова О.С., Наркевич А.М., Логунова П.С., 2026

Для цитирования

Концепция цифровизации при оценке качества элементов опасных производственных объектов / Тулупов О.Н., Черяпкин А.Ф., Наркевич М.Ю., Логунова О.С., Наркевич А.М., Логунова П.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 108-122. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-108-122>



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

CONCEPT OF DIGITALIZATION IN QUALITY ASSESSMENT OF ELEMENTS OF HAZARDOUS PRODUCTION FACILITIES

Tulupov O.N.¹, Cheryapkin A.F.¹, Narkevich M.Yu.¹, Logunova O.S.¹, Narkevich A.M.¹, Logunova P.S.¹

¹Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

²PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works (MMK), Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The relevance of the study is determined by modern requirements for the digitalization of infrastructure for quality management of elements of hazardous production facilities in order to reduce accidents and incidents. **Objectives.** The aim of the study is to substantiate and develop a new concept of digitalization for assessing the quality of elements of hazardous production facilities. **Methods Applied.** The study employed system analysis methods, in particular decomposition and generalization in the construction of diagrams based on the IDEF0 standard technology, as well as an analysis of the regulatory framework for industrial safety management. A new concept of digitalization in the field of industrial safety for assessing the quality of management and elements of hazardous production facilities has been developed. The concept is distinguished by the use of four basic principles: consistency, adaptability, multiplatform capability, and validity. The concept is based on a new management-structure mentality, challenges posed by industrial safety requirements, a stable and flexible regulatory framework, a sustainable traditional industrial safety management structure, and a high level of development of new digital technologies. **Results.** The results of the study have been used to develop a unique automated system for monitoring the technical condition of elements of a metallurgical enterprise as part of a research project. The developed system has been tested on the developer's platform, confirming the operability of the proposed concept. The concept of digitalization for assessing the quality of elements of hazardous production facilities is aimed at creating next-generation digital systems incorporating artificial intelligence technologies for quality assessment of elements of hazardous production facilities.

Keywords: hazardous production facilities, digitalization in quality assessment, new concept, consistency, adaptability, multiplatform capability, validity

The study was financially supported by R&D carried out under an agreement between Nosov Magnitogorsk State Technical University and PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works on the topic "Development and Application of Methods for Monitoring the Territory, Buildings, and Structures of PJSC MMK Using Unmanned Aerial Vehicles.

For citation

Tulupov O.N., Cheryapkin A.F., Narkevich M.Yu., Logunova O.S., Narkevich A.M., Logunova P.S. Concept of Digitalization in Quality Assessment of Elements of Hazardous Production Facilities. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 108-122. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-108-122>

Введение

Успешное функционирование крупных промышленных предприятий, включая металлургическую отрасль, определяется множеством факторов и разнообразием инфраструктур. Одной из таких инфраструктур является система управления промышленной безопасностью, в функции которой входит мониторинг технического состояния элементов производственной инфраструктуры предприятия в составе опасных производственных объектов. На государственном уровне определены требования безаварийного производства как стратегически важного направления для отечественной экономики, а также повышения инвестиционной привлекательности российских компаний на мировом рынке.

На фоне увеличения количества опасных производственных объектов (рис. 1) и растущей интенсивности их эксплуатации увеличивается вероятность возникновения аварий и инцидентов.

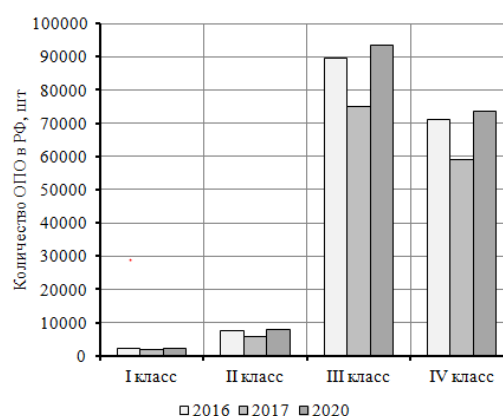


Рис. 1. Количество единиц опасных производственных объектов, зарегистрированных на территории РФ

Fig. 1. Number of hazardous production facility units registered in the Russian Federation

Согласно заявлению Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор), в России установился тренд на ежегодное снижение общего числа аварий на опасных производственных объектах и, как следствие, общего количества погибших и травмированных людей. В 2019 году количество аварий на опасных производственных объектах составило 150, что на 14,3% меньше, чем в 2018 году, а несчастных случаев со смертельным исходом произошло 165, что, в свою очередь, на 7% меньше, чем в 2018 году.

Следует отметить, что общее снижение количества аварий на опасных производственных объектах в целом не характеризует аварийность в отдельных отраслях промышленности. Например, зафиксирован рост числа аварий на объектах нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности, составивший примерно 37% за 2019 год. Причем на объектах нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности опасных производственных объектов высокого (II) и чрезвычайного высокого (I) классов опасности значительно больше, чем в других отраслях промышленности. По данным, представленным Ростехнадзором, в последние годы отмечается всплеск аварийности на объектах металлургических и коксохимических производств (рис. 2). На рис. 2 введены обозначения: КА – количество аварий; СМ – количество смертельно травмированных людей; КГНС – количество групповых несчастных случаев.

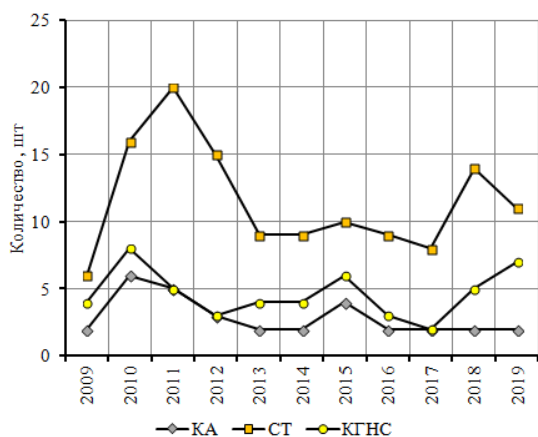


Рис. 2. Динамика аварийности и травматизма на объектах металлургического производства
Fig. 2. Dynamics of accidents and occupational injuries at metallurgical production facilities

Согласно данным, опубликованным в RISKNEWS, экономический ущерб от аварий на объектах нефтегазового комплекса за 11 месяцев 2020 года вырос на 76% и составил 5 млрд 356 млн руб. (без учета экологического ущерба). Таким образом, при общем снижении числа аварий на опасных производственных объектах состояние защищенности жизненно важных интересов личности и общества продолжает оставаться под угрозой, в том числе из-за высокого уровня аварийности объектов I и II классов опасности.

Статистические данные показывают, что среди всех видов аварий на опасных производственных объектах, аварии, вызванные разрушением зданий и сооружений, являются одними из самых редких. Однако такие аварии «лидируют» по величине ущерба, так как в случае обрушения строительных конструкций производственных объектов избежать повреждений технологического оборудования практически невозможно. Это приводит к негативным последствиям в виде выбросов опасных веществ, взрывов топливно-воздушных смесей, пожаров, экологических загрязнений. В условиях обрушения зданий и сооружений работы по оперативной ликвидации последствий аварий значительно затрудняются. Поэтому величина риска разрушения зданий и сооружений на опасных производственных объектах является одним из ключевых критериев обеспечения промышленной безопасности.

Переход зданий и сооружений на опасных производственных объектах в аварийное состояние на стадии эксплуатации происходит вследствие накопления эксплуатационных дефектов и повреждений, перегрузки конструкций в результате нарушения технологического процесса и производственных инструкций, образования значительных снеговых и пылевых отложений на элементах конструкций и воздействия опасных природных и техногенных факторов.

Высокие показатели по количеству аварий и инцидентов явились вызовом к созданию системы обеспечения промышленной безопасности и, в частности, к понятию качества управления опасными производственными объектами. Такая система базируется на комплексе нормативной базы для экспертной оценки качества опасных производственных объектов.

Материалы и методы исследования

Характеристика и тенденции трансформации нормативной базы экспертной оценки качества опасных производственных объектов

В рамках традиционного подхода к оценке качества зданий и сооружений на опасных производственных объектах (например, ГОСТ 31937-2024 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния», СП 13-102-2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений», РД 08-95-95 «Положение о системе технического диагностирования сварных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов» и др.) вопросы безопасности зданий, сооружений, технических устройств и их частей продолжают оставаться актуальными и требующими разработки и использования принципиально нового подхода, основанного на последних достижениях науки и техники.

Следует отметить, что, в соответствии с действующим законодательством, оценка качества проводится на всех этапах жизненного цикла зданий, сооружений и технических устройств (инженерные изыскания, проектирование, строительство (в том числе консервация), эксплуатация (в том числе текущие ремонты), реконструкция, капитальный ремонт, демонтаж). Качество и,

как следствие, безопасность использования зданий, сооружений, технических устройств и их частей напрямую зависит от ряда факторов: периодичности контроля, квалификации специалистов, точности применяемых средств контроля, а также условий, при которых осуществляется контроль.

Согласно ФЗ № 116 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», организация, эксплуатирующая опасный производственный объект, обязана подтвердить соответствие зданий, сооружений и технических устройств обязательным требованиям промышленной безопасности путем проведения экспертизы. Кроме того, несоблюдение требований промышленной безопасности приводит к возникновению аварий и инцидентов на опасных производственных объектах, что влечет за собой остановку производственного процесса, значительные экономические убытки, причинение вреда окружающей среде, а иногда и человеческие жертвы. При этом подтверждение соответствия объекта экспертизы обязательным требованиям оценивается на момент проведения экспертизы промышленной безопасности.

В настоящее время имеет место традиционная модель дискретной оценки качества зданий и сооружений исходя из экспертного анализа степени соответствия установленным требованиям промышленной безопасности. Устанавливается один из следующих выводов:

- объект экспертизы *соответствует* требованиям промышленной безопасности и может быть применен при эксплуатации опасного производственного объекта;
- объект экспертизы *не соответствует* требованиям промышленной безопасности и не может быть применен при эксплуатации опасного производственного объекта.

Следует подчеркнуть, что данная оценка соответствия отражает реальное состояние опасного производственного объекта лишь на дату утверждения заключения промышленной безопасности, при этом действует на несколько лет вперед, до следующей экспертизы.

С вступлением в силу Федерального закона «О техническом регулировании» № 184-ФЗ произошло совершенствование правовых основ путем установления обязательных требований к продукции и процессам на всех стадиях жизненного цикла (проектирование, производство, эксплуатация и утилизация), а также реформирование в сферах стандартизации, подтверждения соответствия, государственного контроля и надзора с учетом требований Всемирной торговой организации (ВТО). При этом образована единая, взаимоувязанная система технического нормирования безопасности и качества продукции и услуг, подтверждения соответствия, государственного контроля и надзора. Требования к продукции разделены на обязательные, установленные техническими регламентами (ТР), и добровольные, содержащиеся в стандартах.

В отношении зданий и сооружений действует ФЗ от 30 декабря 2009 года № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». В отношении опасных производственных объектов действует ФЗ №116 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» и федеральные нормы и правила (ФНП) в области промышленной безопасности «Правила проведения экспертизы промышленной безопасности» от 20.10.2020 № 420. Согласно данным ФНП, устанавливаются требования к проведению экспертизы зданий и сооружений на опасном производственном объекте, а также мероприятия по обследованию зданий и сооружений (включая материалы и конструкции).

Действующая редакция ФЗ №116 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» предусматривает создание на предприятиях, эксплуатирующих опасные производственные объекты I или II класса опасности, систему управления промышленной безопасностью и обеспечивать ее функционирование (ст. 11, п. 3).

Определения технического термина «система управления промышленной безопасностью» несколько различны и представлены в основных действующих нормативных документах (табл. 1).

Таблица 1. Технические определения термина «система управления промышленной безопасностью» согласно нормативным документам

Table 1. Technical definitions of the term “industrial safety management system” according to regulatory documents

Определение	Источник
Комплекс взаимосвязанных организационных и технических мероприятий, осуществляемых организацией, эксплуатирующей опасные производственные объекты, в целях предупреждения аварий и инцидентов на опасных производственных объектах, локализации и ликвидации последствий таких аварий	1. Федеральный закон № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» в ред. от 08.12.2020 г. 2. ГОСТ Р 57717-2024 «Горное дело. Безопасность в угольных шахтах. Термины и определения» от 01.01.2025 г.
Механизм, обеспечивающий непрерывный и целенаправленный процесс воздействия на промышленную безопасность и включающий комплекс мер правового, организационного, технического, экономического, информационного, образовательного и социального характера, направленных на предупреждение, предотвращение и ликвидацию аварий на опасных производственных объектах	1. РД 04-354-00 «Положение о надзорной и контрольной деятельности в системе Госгортехнадзора России» от 26.04.2000 г. 2. СТО 70238424.27.010.001-2008 «Электроэнергетика. Термины и определения» от 30.06.2008 г.
Комплекс согласованных организационно-технических мероприятий и действий органов управления по соблюдению требований и норм промышленной безопасности	РД № 153-34.0-03.124-2001 «Положение о системе управления промышленной безопасностью в РАО "ЕЭС России"» от 12.05.2001 г.

Переход к цифровым технологиям при эксплуатации опасных производственных объектов, в том числе в части эксплуатации зданий, сооружений и технических устройств, должен соответствовать законодательным требованиям. Однако правовое регулирование обычно отстает от фактически складывающихся отношений, связанных с использованием цифровых технологий. Таким образом, актуальной задачей современного правового регулирования является разработка норм, позволяющих выполнить цифровизацию и информатизацию процессов в области промышленной безопасности.

С 2019 года Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору РФ (Ростехнадзор) планировалось отменить Федеральный закон № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 года и заменить его на обновленный масштабный с множеством нововведений, основанных на применении технологий машинного зрения и интеллектуальной экспертизы (использование современных цифровых инструментов). Однако даже в существующей редакции законопроект вызывает дискуссии, в связи с чем 19.12.2022 года в соответствии с Протоколом № 74 Совета Государственной Думы РФ было принято решение согласиться с предложениями комитетов о переносе рассмотрения указанного законопроекта на более поздний срок.

В соответствии со стратегией развития информационного общества и искусственного интеллекта в Российской Федерации, которые представлены в Указах Президента РФ от 09.05.2017 № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017-2030 годы» и от 10.10.2019 № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации», появляется и развивается возможность применения искусственного интеллекта и в сфере промышленной безопасности.

С учетом активного развития процессов перехода к цифровым технологиям, их проникновения в том числе и в производственные отношения, действующая редакция федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила проведения экспертизы промышленной безопасности» постоянно дорабатывается. Внесены изменения в части оценки фактического состояния технических устройств, зданий и сооружений (п. 23): «При оценке фактического состояния технических устройств, зданий и сооружений на опасных производственных объектах допускается использование информации автоматизированных систем мониторинга их технического состояния».

В табл. 2 приведены основные этапы перспективных изменений федерального законодательства в области промышленной безопасности, которые являются предпосылками для проведения цифровизации и информатизации в области оценки соответствия опасных производственных объектов.

На основании многолетнего практического опыта проведения экспертиз зданий, сооружений, технических устройств и их частей установлено, что подавляющее

большинство дефектов, влияющих на их безопасность, выявляется органолептическим методом на стадии визуально-измерительного контроля. При этом современные инструменты контроля за безопасностью зданий и сооружений, основанные на технологиях машинного зрения и интеллектуальной экспертизы (использование современных цифровых инструментов), не используются. Важно учитывать, что помимо фактической цифровой трансформации необходимо совершенствовать правовое регулирование.

Как отмечено в стратегии цифровой трансформации и информатизации обрабатывающих отраслей промышленности в целях достижения их «цифровой зрелости» до 2024 года и на период до 2030 года, пробелы в законодательной и нормативной правовой базе ограничивают действия федеральных и региональных органов исполнительной власти, а также способность хозяйствующих субъектов эффективно реагировать на меняющуюся рыночную ситуацию с учетом перспектив развития цифровых технологий. Требуется совершенствование нормативных правовых документов в области технического регулирования, налогового и бюджетного законодательства. Сложность административной процедуры разработки и утверждения нормативно-правовых, технических и технологических документов препятствует внедрению новых технологий. Следовательно, работу по правовому регулированию обеспечения промышленной безопасности при помощи современных инструментов контроля за безопасностью зданий и сооружений, основанных на технологиях машинного зрения и интеллектуальной экспертизы, необходимо проводить параллельно с разработкой указанных инструментов.

Традиционная система управления промышленной безопасностью на опасных производственных объектах и ее недостатки

Для определения концепции цифровизации и информатизации в области при оценке качества опасных производственных объектов необходимо понимание традиционной системы управления промышленной безопасностью на опасных производственных объектах и ее недостатков.

В настоящее время применяется метод дискретной оценки качества для зданий, сооружений, технических устройств и их частей на соответствие требованиям промышленной безопасности.

В период между проведением экспертиз детальная экспертная оценка соответствия технического состояния зданий, сооружений, технических устройств и их частей не проводится. В указанный период сохраняется вероятность появления и развития критических дефектов, влияющих на переход зданий, сооружений, технических устройств и их частей в аварийное состояние. При этом опасные факторы аварий, такие как взрыв, пожар и др., связанные исключительно с технологическим оборудованием, могут ускорить процесс перехода конструкции в аварийное состояние, а в отдельных случаях привести и к хрупкому (внезапному) разрушению конструкции.

Таблица 2. Этапы перспективных изменений федерального законодательства в области промышленной безопасности, являющихся предпосылками к цифровизации в области оценки соответствия опасных производственных объектов

Table 2. Stages of prospective changes in federal legislation in the field of industrial safety serving as prerequisites for digitalization in the assessment of conformity of hazardous production facilities

Этап	Название документа	Дата введения	Концептуальное изменение, требующее цифровизации и информатизации при оценке соответствия опасных производственных объектов
I	Федеральный закон № ФЗ-116 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»	21.07.1997	–
II	Приказ Ростехнадзора № 420 Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила проведения экспертизы промышленной безопасности»	20.10.2020	–
III	Постановление Правительства Российской Федерации № 2415 «Положение о проведении эксперимента по внедрению системы дистанционного контроля промышленной безопасности»	31.12.2020	Устанавливает порядок проведения эксперимента по дистанционному контролю выполнения требований промышленной безопасности на опасных производственных объектах (с 1 февраля 2021 года по 31 декабря 2025 года) путем автоматизированного контроля рисков, перехода к проактивной модели надзора и цифровизации взаимодействия с Ростехнадзором
IV	Приказ Ростехнадзора № 120 «О внесении изменений в федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила проведения экспертизы промышленной безопасности»	13.04.2022	При оценке фактического состояния технических устройств, зданий и сооружений на опасных производственных объектах допускается использование информации автоматизированных систем мониторинга их технического состояния. Введение бинарной оценки соответствия элементов опасных производственных объектов
V	Федеральный закон № 637-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" и отдельные законодательные акты Российской Федерации»	25.12.2023	Организации, эксплуатирующие опасные производственные объекты I класса опасности, обязаны обеспечивать проведение аудита систем управления промышленной безопасностью. Сведения о результатах такого аудита ежегодно до 1 апреля соответствующего календарного года представляются коллегиальным органам управления данных эксплуатирующих организаций и их учредителям
VI	Приказ Ростехнадзора № 29 «О внесении изменений в федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила проведения экспертизы промышленной безопасности»	29.01.2025	При оценке фактического состояния технических устройств, зданий и сооружений на опасных производственных объектах допускается использование информации автоматизированных систем мониторинга их технического состояния, применяемых юридическим лицом (индивидуальным предпринимателем), эксплуатирующим опасный производственный объект
VII	«Об интеллектуализации оценки соответствия элементов опасных производственных объектов»	Ближайшие пять лет	Введение технологий искусственного интеллекта в автоматизированные системы оценки соответствия элементов опасных производственных объектов

Структура системы управления промышленной безопасностью на металлургическом предприятии и ее основные задачи представлены на **рис. 3**. На **рис. 3** введены обозначения: ПБ – промышленная безопасность; ОПО – опасный производственный объект.

Традиционная технология проведения экспертной оценки качества продукции (блок 2 на **рис. 4**) в настоящее время базируется на обоснованной системе нормативной документации, включая экспертную оценку элементов опасных производственных объектов: технических устройств, зданий и сооружений.

На **рис. 4** приведена диаграмма декомпозиции уровня А0, в которой определены входные информационные потоки, возможные результаты, управляющие воздействия и исполнительные механизмы с точки зрения руководителя организации заказчика экспертизы, обеспечивающего информационное сопровождение экспертизы элементов опасных производ-

ственных объектов по традиционной технологии, используемой в настоящее время.

Обозначения, использованные на **рис. 4**, представлены в **табл. 3**.

Изучение традиционной системы экспертной оценки привело к декомпозиции, в которой вводится от трех до шести элементов (**рис. 5-9**).

На **рис. 5** введены обозначения: *I* – перечень объектов на экспертизу; *I2* – техническое задание на проведение экспертизы; *I3* – информация о текущем состоянии объектов экспертизы; *I4* – результаты экспертизы.

В **табл. 4** представлен перечень обозначений, приведенных на **рис. 6**.

В **табл. 5** представлен перечень обозначений, приведенных на **рис. 7**.

На этапе выполнения работ непосредственно на объекте при проведении экспертизы рассматриваются

три инструментальных этапа, в ходе которых формируется основная информация о состоянии элементов опасных производственных объектов.

На рис. 8, 9 введены обозначения: I1.2.2.1-2 – сведения о фактическом состоянии объекта экспертизы, включая количественные значения контролируемых параметров; I1.2.2.2-3 – сведения о соответствии (несоответствии) фактических значений контролируемых параметров объекта экспертизы установленным требованиям.

Анализ функциональной модели, отображающей информационные потоки при проведении экспертизы элементов опасных производственных объектов, показал, что основным инструментальным средством является человек-эксперт. В обязанности эксперта входит визуальное и инструментальное обследование. Применение новых информационных технологий и прикладных цифровых платформ (ПЦП) традиционной технологией проведения экспертизы не предусмотрено.

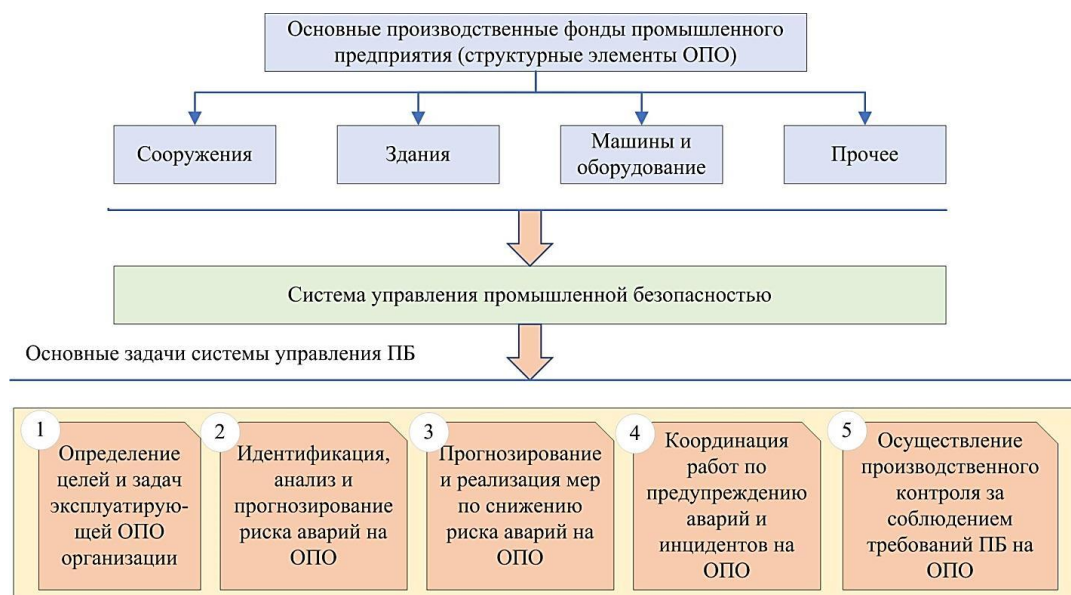


Рис. 3. Структура системы управления и основные задачи системы управления промышленной безопасностью на опасном производственном объекте

Fig. 3. Structure of the management system and main tasks of the industrial safety management system at a hazardous production facility

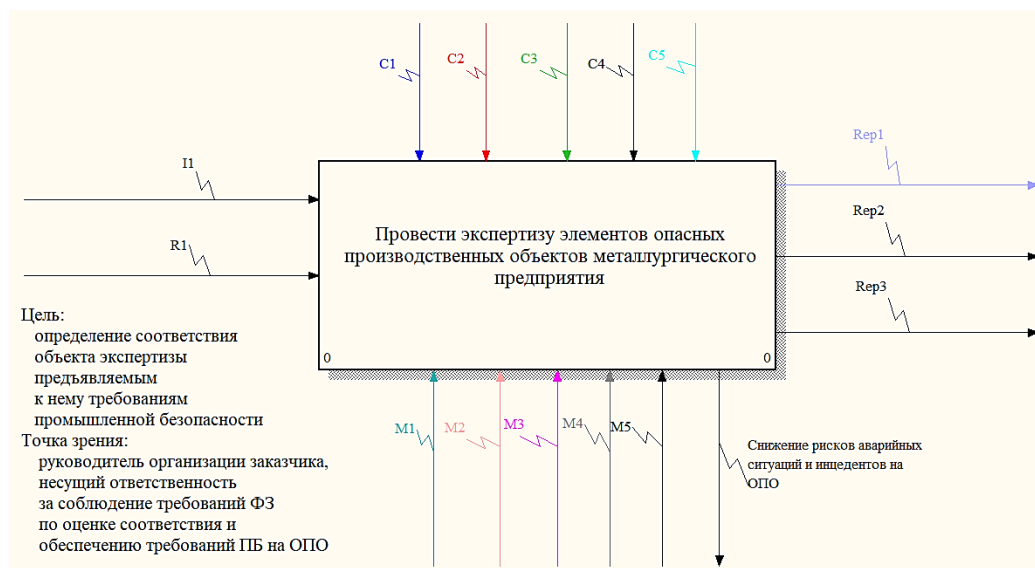


Рис. 4. Диаграмма декомпозиции A0 традиционной технологии процесса экспертизы элементов опасных производственных объектов

Fig. 4. A0 decomposition diagram of the traditional process technology for the examination of elements of hazardous production facilities

Таблица 3. Перечень обозначений, приведенных на рис. 4

Table 3. List of designations shown in Fig. 4

Обозначение	Значение
Перечень управляющей информации	
C1	Требования Федерального законодательства
C2	Требования Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор)
C3	Иные требования
C4	Особые требования заказчика
C5	Требования внутренних регламентов исполнителя
Перечень входной информации	
I1	Перечень объектов экспертной оценки и их характеристика
R1	Финансовые ресурсы для проведения экспертизы качества объекта
Перечень выходной информации	
Rep1	Объективная информация о соответствии (не в полной мере соответствии, не соответствии) требованиям промышленной безопасности
Rep2	Перечень дефектов и повреждений объекта экспертной оценки
Rep3	Перечень комплексных мероприятий для приведения объекта в состояние, соответствующее требованиям промышленной безопасности
Перечень исполнителей экспертизы	
M1	Представители организации-заказчика экспертизы
M2	Руководитель экспертной организации-исполнителя
M3	Ответственный за бюджет от экспертной организации-исполнителя
M4	Эксперты в области промышленной безопасности
M5	Специалисты по областям: разрушающий и неразрушающий контроль, расчеты конструкций зданий, сооружений, технических устройств, геодезия и др.

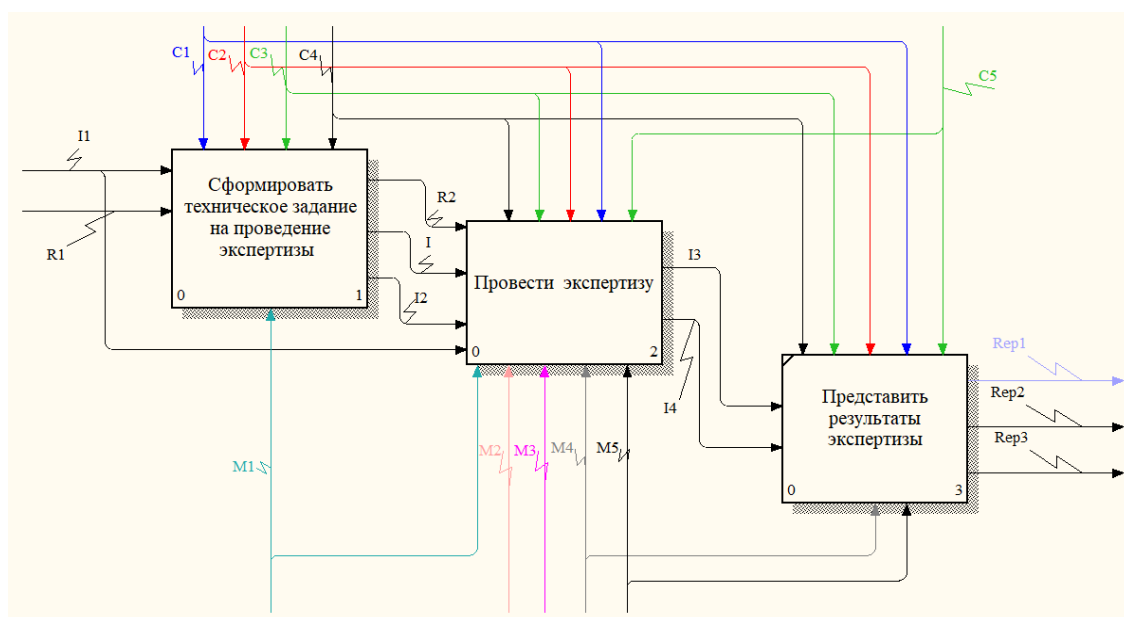


Рис. 5. Уровень декомпозиции A1 при проведении экспертизы элементов опасных производственных объектов
Fig. 5. A1 decomposition level in the examination of elements of hazardous production facilities

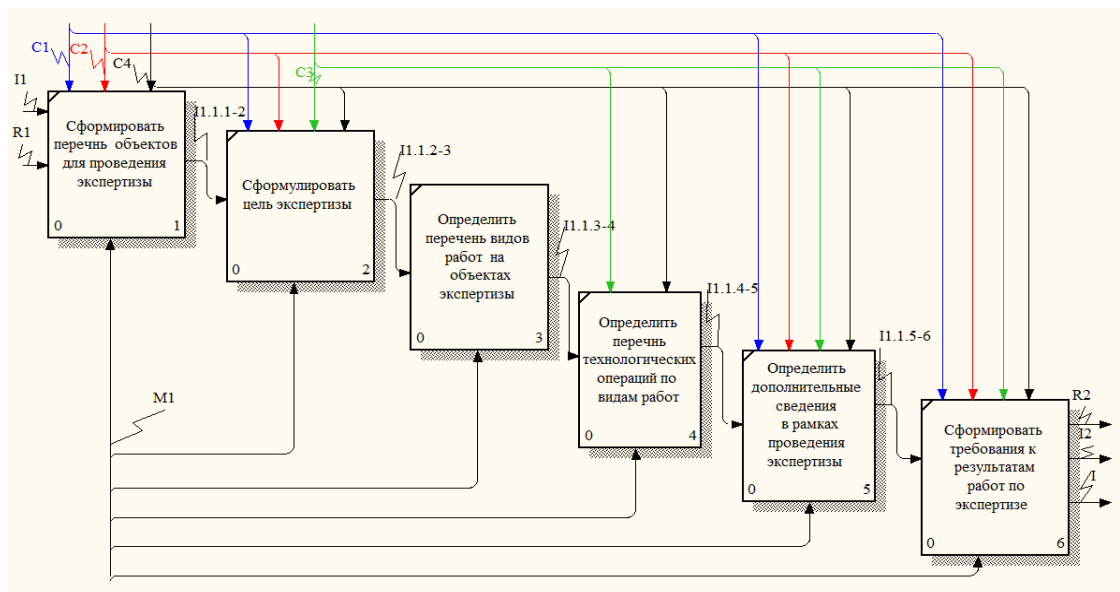


Таблица 5. Перечень обозначений, приведенных на рис. 7

Table 5. List of designations shown in Fig. 7

Обозначение	Значение
I1.2.1-2	Информация об объекте экспертизы, перечень средств для проведения экспертизы, кадровый состав исполнителей
I1.2.2-3	Сведения о категории технического состояния объекта экспертизы
R2.1-2	Информация о планируемых затратах на проведение экспертизы
R2.1-3	Информация о фактических расходах на проведение экспертизы

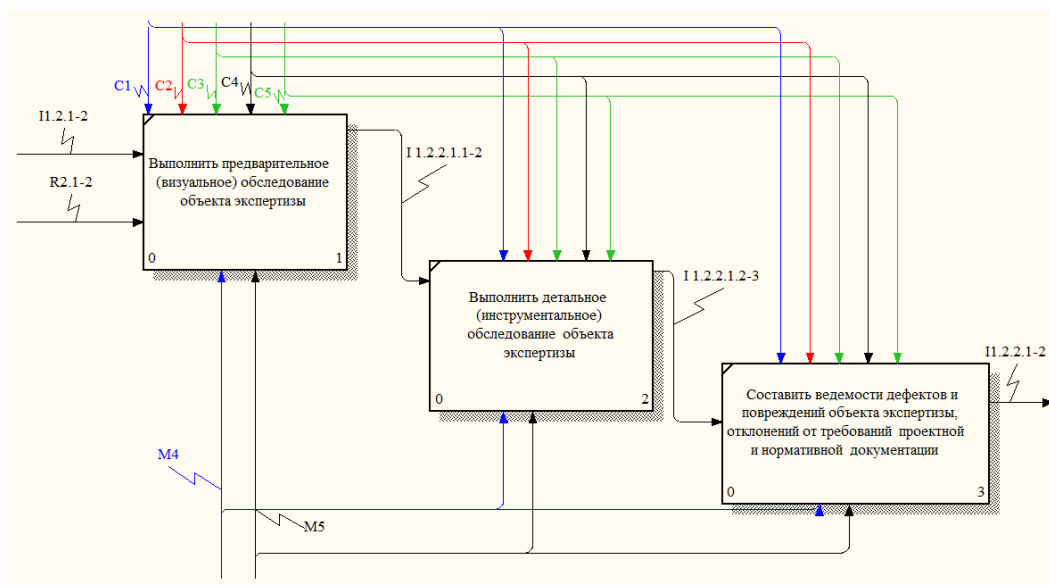


Рис. 8. Уровень декомпозиции A22.1 при проведении экспертизы элементов опасных производственных объектов на этапе представления результатов

Fig. 8. A22.1 decomposition level in the examination of elements of hazardous production facilities at the stage of presenting the results

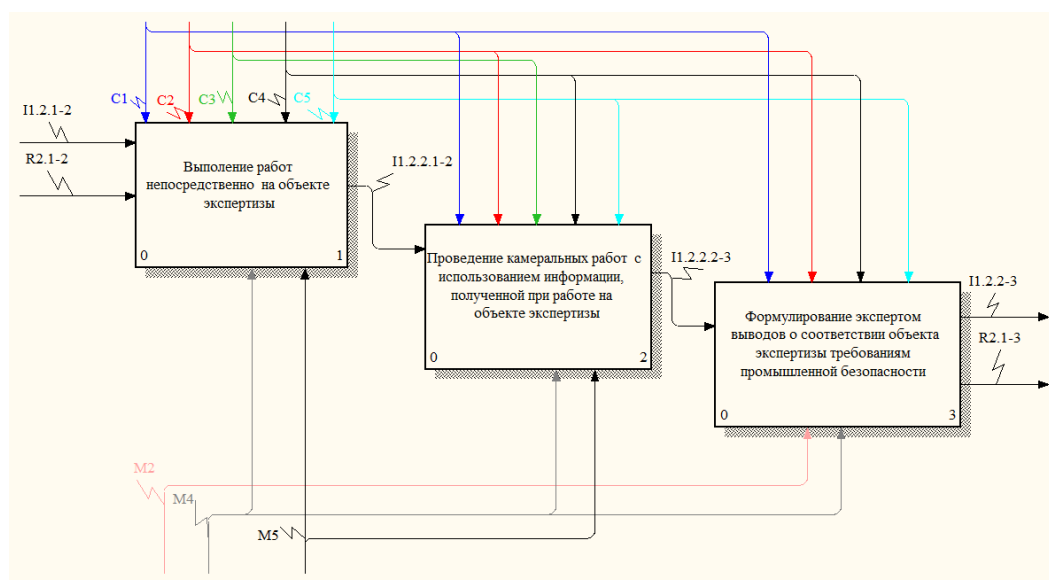


Рис. 9. Уровень декомпозиции A22.2 при проведении экспертизы элементов опасных производственных объектов на этапе представления результатов

Fig. 9. A22.2 decomposition level in the examination of elements of hazardous production facilities at the stage of presenting the results

В настоящее время крупные промышленные компании и предприятия России финансово и интеллектуально инвестируют средства в создание принципиально новых технологий, позволяющих предотвратить потенциальный риск возникновения аварий и инцидентов на опасных производственных объектах, минимизировать возможные последствия различных аварийных ситуаций.

Концепция преобразования системы управления качеством опасных производственных объектов

Под цифровизацией в настоящей статье понимается получение без участия человека изображений опасного производственного объекта или его части в цифровом виде, их обработка, преобразование, определение качественных и (или) количественных характеристик параметров безопасности, верификация, хранение, информационное моделирование, прогнозирование параметров безопасности, принятие решений, формирование отчета и визуализация данных, передача данных в систему управления промышленной безопасностью опасного производственного объекта и в Ростехнадзор. Следует отметить отличие информатизации от цифровизации как удовлетворение информационных потребностей общества и отдельных личностей для целей управления и прогнозирования.

Внедрение автоматизированных цифровых систем непрерывного мониторинга в процессы оценки качества зданий, сооружений, технических устройств и их частей на различных этапах их жизненного цикла обусловлено необходимостью проведения оценки их безопасности в режиме реального времени как потребность и неизбежность в управлении предприятиями. Это позволяет снизить риск разрушения зданий, сооружений, технических устройств и их частей на опасных производственных объектах, повысить их эксплуатационную надежность и долговечность, а также спрогнозировать переход зданий, сооружений, технических устройств и их частей в аварийное состояние. Таким образом, предмет предлагаемого исследования находится в фокусе сразу нескольких областей научного знания.

Полученные результаты и их обсуждение

Проведенный анализ позволяет утверждать, что в настоящее время сложилось пять фундаментальных элементов для определения концепции цифровизации и информатизации в области управления качеством элементов опасных производственных объектов как их инфраструктуры:

- 1) трансформированный *менталитет* структуры управления промышленным предприятием, направленный на внедрение, развитие и трансформацию инфраструктуры на цифровизацию и информатизацию во всех подразделениях;
- 2) неустрашимый *вызов* со стороны требований промышленной безопасности, подтвержденных статистическими исследованиями, о необходимости сниже-

ния рисков аварий и инцидентов, который невозможно снизить без наличия полной и достоверной информации о причинах их возникновения и планирования мероприятия об их предотвращении [1-5];

3) *наличие* устойчивой, но в то же время гибкой и чувствительной к изменениям социальной и промышленной среды, *нормативной базы* к требованиям промышленной безопасности;

4) *наличие устойчивой инфраструктуры* управления промышленной безопасностью и качеством элементов опасных производственных объектов, построенной на основе нормативной базы и функционирующей с использованием многолетнего экспертного человеческого субъективного опыта [6, 7];

5) *высокий уровень развития* технологий и средств цифровизации и информатизации, имеющих научное обоснование для их применения в социальной и промышленной сферах, включая область промышленной безопасности [9-11].

Наличие этой фундаментальной платформы позволило сформулировать концепцию цифровизации и информатизации управления элементами опасного производственного объекта в сфере промышленной безопасности для металлургического предприятия. Концепция включает следующие положения:

- 1) *непротиворечивость* цифровой платформы нормативной базе Российской Федерации по требованиям промышленной безопасности, соблюдающей гармонизацию традиционных и новых показателей качества элементов опасных производственных объектов;
- 2) *адаптивность* цифровой платформы к новым изменениям в гибкой системе законодательства по требованиям промышленной безопасности с тенденцией развития искусственного интеллекта, направленного на принятие решений о мероприятиях, предотвращающих аварии и инциденты;
- 3) *мультиплатформенность* цифровой системы, способной функционировать на различных уровнях и при изменении условий эксплуатации, включающих программное и аппаратное обеспечения системы;
- 4) *обоснованность* принимаемых решений, синтезированных на научной основе построения и сопровождения цифровой платформы.

Обсуждение

Опираясь на предложенную концепцию, авторами исследования предложена пилотная реализация прикладной цифровой платформы для автоматизированного мониторинга технического состояния элементов опасных производственных объектов. Основы построения платформы изложены в диссертационных исследованиях [12]. Обеспечивая положения концепции, авторы использовали результаты пилотного обследования опасных производственных объектов крупного металлургического предприятия [13, 14], разработали теорию гармонизации традиционных и новых показателей качества опасных производственных объектов [15], построили теорию для оптимизации траектории полета мульт-

тироторного летательного аппарата для сбора информации о техническом состоянии элементов опасных производственных объектов [16], выполнили опробование новой цифровой системы на платформе разработчика [17, 18]. Опробование системы доказало работоспособность предложенной концепции для построения цифровых систем оценки качества элементов опасных производственных объектов для металлургического предприятия. Аналогов построенных систем в Российской Федерации и за ее пределами для области промышленной безопасности в проблеме оценки качества элементов опасных производственных объектов не найдено.

Заключение

На основе проведенных исследований установлено, что:

1) статистические показатели, характеризующие количество аварий и инцидентов с человеческими жертвами и смертельными случаями, демонстрируют их ежегодное обязательное сопровождение при функционировании элементов опасных производственных объектов в каждой отрасли промышленности с максимальными значениями в нефтедобывающей и металлургической областях;

2) существующая нормативная база в области управления промышленной безопасностью и качеством элементов опасных производственных объектов динамично изменяется и адаптируется к социальным и экономическим требованиям снижения количества аварий и инцидентов, а также имеет тенденцию к цифровой и информационной трансформации, способствующей переходу к новым технологиям;

3) традиционная система управления промышленной безопасностью и качеством элементов опасных производственных объектов в настоящее время не имеет модулей интеллектуальной поддержки принятия решений и искусственного интеллекта и базируется только на субъективной экспертной оценке человека-эксперта с уникальным опытом, который должен быть переведен на новый цифровой уровень для удовлетворения информационных потребностей предприятия;

4) предложенная концепция цифровизации, базирующаяся на четырех основных положениях – непротиворечивости, адаптивности, мультиплатформенности и обоснованности, является работоспособной и должна быть основой для создания цифровых систем в области промышленной безопасности нового поколения.

Список источников

1. Безпальчук М.А., Щербенко Е.В. Зарубежный опыт регулирования политики промышленной безопасности // Актуальные проблемы безопасности в техносфере. 2023. № 3(11). С. 87-92. DOI: 10.34987/2712-9233.2023.27.16.016. EDN NHJGPS.
2. Сейтхалилов Е.П., Чернецов Д.А. Анализ произошедших аварийных инцидентов на котельной с котлом ти-

- па KBGM-100 // Вестник науки. 2024. Т. 4, № 1(70). С. 657-660. EDN NJYUXM.
3. Ким Д.С. Обеспечение безопасности - в первую очередь дело профессионалов // Стандарты и качество. 2012. № 1. С. 32-34. EDN OWWTBV.
4. Результаты экспериментальных испытаний строительных образцов / М.Ю. Наркевич, О.С. Логунова, П.И. Каландаров [и др.] // Серия конференций IOP: Науки о Земле и окружающей среде: 2-я Международная конференция по энергетике, гражданскому и сельскохозяйственному строительству 2021 (ICECAE 2021), Ташкент, 14-16 октября 2021 года. Том. 939. Ташкент: IOP Science, 2021. С. 012031. EDN TXHNUN.
5. Некрасов М.Н., Андрияшина Н.С. Управление производственной безопасностью на промышленных предприятиях // Промышленное развитие России: проблемы, перспективы: сборник статей по материалам XXII Международной научно-практической конференции преподавателей вузов, ученых, специалистов, аспирантов, студентов, Нижний Новгород, 07 ноября 2024 года. Нижний Новгород: Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина, 2024. С. 270-274. EDN GLUDBU.
6. Патент № 2753169 C1 Российская Федерация, МПК G06N 7/00. Способ саморегуляции сетевой инфраструктуры промышленных объектов при воздействии угроз безопасности : № 2020142565 : заявл. 23.12.2020: опубл. 12.08.2021 / М.О. Калинин, Д.С. Лаврова, Е.Ю. Павленко; заявитель ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». EDN PGMSXA.
7. Нарушение требований безопасности в ходе эксплуатации промышленных объектов и объектов социальной инфраструктуры: квалификация и расследование : материалы Международной научно-практической конференции, Москва, 01 ноября 2018 года / под общ. ред. А.М. Багмета. Москва: Московская академия Следственного комитета Российской Федерации, 2018. 252 с. ISBN 978-5-6041504-2-9. EDN PGTJCR.
8. Кузовкова Т.А., Салюткина Т.Ю., Шаравова О.И. Интегральная характеристика состояния и потенциала инфокоммуникационной инфраструктуры на начальном этапе развития цифровой экономики // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. 2020. № 3. С. 120-129. EDN MOPKFU.
9. Асенова Б.К., Кабаева Қ.М. Тамақ және өндеу өнеркәсібін дамытудағы заманауи цифрлық, инновациялық технологиялар // Вестник университета Шкараима. Серия технические науки. 2021. №. 4(4). Р. 38-40. EDN DAIAFQ.
10. Крыжко Д.А., Рудская И.А. Основные аспекты внедрения цифровых технологий на предприятиях промышленности // Фундаментальные и прикладные исследования в области управления, экономики и торговли : сборник трудов Всероссийской научной и учебно-практической конференции. В 3-х ч. Санкт-Петербург, 27-29 мая 2020 года. Ч. 2. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. С. 80-85. EDN EILWAB.
11. Смирнова О.П., Чеснюкова Л.К. Влияние цифровых технологий отраслей промышленности на экономический рост индустриальных регионов // Региональная экономика: теория и практика. 2023. Т. 21, № 9(516).

- C. 1653-1670. DOI: 10.24891/re.21.9.1653. EDN LOVNAT.
12. Наркевич М.Ю. Развитие методологии создания системы менеджмента качества металлургического предприятия, эксплуатирующего опасные производственные объекты, на основе прикладной цифровой платформы : дис. ... д-ра техн. наук / Наркевич Михаил Юрьевич. Магнитогорск, 2023. 332 с. EDN DCFSXK.
13. Results of a pilot experiment on monitoring the condition of buildings and structures using unmanned aerial vehicles / M. Yu. Narkevich, O. S. Logunova, P. I. Kalandarov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 2nd International Conference on Energetics, Civil and Agricultural Engineering 2021 (ICECAE 2021), Tashkent, 14–16 октября 2021 года. Tashkent: IOP Science, 2021, vol. 939, p. 012030. DOI: 10.1088/1755-1315/939/1/012030. EDN GBCJUM.
14. Качество материалов, изделий и конструкций в промышленной безопасности: эмпирическая основа / М.Ю. Наркевич, О.С. Логунова, В.Д. Корниенко [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т. 19, № 3. С. 90-101. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-3-90-101. EDN KXQAWF.
15. Наркевич М.Ю., Логунова О.С. Гармонизация базовых и цифровых показателей принадлежности опасных производственных объектов заданному техническому состоянию // Вестник Череповецкого государственного университета. 2023. № 3(114). С. 31-46. DOI: 10.23859/1994-0637-2023-3-114-3. EDN EUCCMC.
16. Элементы визуализации при обследовании опасных производственных объектов с использованием беспилотного летательного аппарата / А.Е. Козлова, М.Ю. Наркевич, О.С. Логунова, К.Е. Шахмаева // Научная визуализация. 2023. Т. 15, № 2. С. 113-124. DOI: 10.26583/sv.15.2.10. EDN NLDVKD.
17. Программное обеспечение для автоматизированного обнаружения и оценки разрушений соединительных швов зданий / О.С. Логунова, В.В. Кабанова, М.Ю. Наркевич, В.Д. Корниенко // Программные продукты и системы. 2023. № 3. С. 474-485. DOI: 10.15827/0236-235X.143.474-485. EDN KQTPUX.
18. Алгоритмическое и программное обеспечение модуля идентификации типовых объектов на изображениях промышленных зданий / М.Ю. Наркевич, О.С. Логунова, Н.В. Злыдарев [и др.] // Электротехнические системы и комплексы. 2024. – № 2(63). С. 80-89. DOI: 10.18503/2311-8318-2024-2(63)-80-89. EDN ECNDMP.
3. Kim D.S. Ensuring safety is primarily the responsibility of professionals. *Standarty i kachestvo* [Standards and quality]. 2012;(1):32-34. (In Russ.) EDN OWWTBV.
4. Narkevich M.Yu., Logunova O.S., Kalandarov P.I., et al. Results of experimental tests of construction specimens. *Seriya konferentsiy IOP: Nauki o Zemle I okruzhayushchei srede: 2-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya po energetike, grazhdanskomu i selskokhozyaistvennomu stroitelstvu 2021 (ICECAE 2021)* [IOP Conference series: Earth and environmental science: 2nd International Conference on Energetics, Civil and Agricultural Engineering 2021 (ICECAE 2021)]. Tashkent: IOP Science, 2021, vol. 939, p. 012031. (In Russ.). EDN TXHNUN.
5. Nekrasov M.N., Andryashina N.S. Industrial safety management at industrial enterprises. *Promyshlennoe razvitie Rossii: problemy, perspektivy: Sbornik statei po materialam XXII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii prepodavateley vuzov, uchenykh, spetsialistov, aspirantov, studentov* [Industrial development of Russia: problems and prospects: Proceedings of the 22nd International Scientific and Practical Conference of University Lecturers, Scientists, Specialists, Postgraduate Students, and Students]. Nizhny Novgorod: Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University, 2024, pp. 270-274. (In Russ.). EDN GLUDBU.
6. Kalinin M.O., Lavrova D.S., Pavlenko E.Yu. *Sposob samoregulyatsii setevoy infrastruktury promyshlennykh obektov pri vozdeistvii ugroz bezopasnosti* [Method for self-regulation of the network infrastructure of industrial facilities under security threats]. Patent RU, no. 2753169 C1, 2021.
7. Bagmet A.M. *Narushenie trebovaniy bezopasnosti v khode ekspluatatsii promyshlennykh obektov i obektov sotsialnoi infrastruktury: kvalifikatsiya i rassledovanie : Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Violation of safety requirements during the operation of industrial facilities and social infrastructure facilities: qualification and investigation: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Moscow: Moscow Academy of the Investigative Committee of the Russian Federation, 2018, 252 p. (In Russ.) ISBN 978-5-6041504-2-9. EDN PGTJCR.
8. Kuzovkova T.A., Salyutina T.Yu., Sharavova O.I. Integral characteristics of the state and potential of the infocommunication infrastructure at the initial stage of digital economy development. *RISK: Resursy, Informatsiya, Snabzhenie, Konkurentsia* [RISK: resources, information, supply, competition]. 2020;(3):120-129. (In Russ.). EDN MOPKFU.
9. Asenova B.K., Kabaeva K.M. Modern digital and innovative technologies in the development of the food and processing industry. *Vestnik universiteta Shakarima. Seriya tekhnicheskie nauki* [Shakarim University Bulletin. Technical sciences series]. 2021;(4(4)):38-40. (In Russ.). EDN DAIAFQ.
10. Kryzhko D.A., Rudskaya I.A. Key aspects of implementing digital technologies at industrial enterprises. *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v oblasti upravleniya, ekonomiki i trgovli: Sbornik trudov vserossiiskoy nauchnoy i uchebno-prakticheskoy konferentsii* [Fundamental and applied research in management, economics and trade. Proceedings of the All-Russian Scientific and Educational-Practical Conference]. Saint Petersburg:

References

1. Bezpalchuk M.A., Shcherbenko E.V. Foreign experience in industrial safety policy regulation. *Aktualnye problemy bezopasnosti v tekhnosfere* [Current issues of safety in the technosphere]. 2023;(3(11)):87-92. (In Russ.) DOI: 10.34987/2712-9233.2023.27.16.016. EDN NHJGPS.
2. Seithkhalilov E.P., Chernetsov D.A. Analysis of accidents at a boiler house equipped with a KVGМ-100-Type boiler. *Vestnik nauki* [Bulletin of science]. 2024;4(1(70)):657-660. (In Russ.). EDN NJYUXM.

- Politekh-Press, 2020, pp. 80-85. (In Russ.). EDN EILWAB.
11. Smirnova O.P., Chesnyukova L.K. Impact of digital technologies in industrial sectors on the economic growth of industrial regions. *Regionalnaya ekonomika: teoriya i praktika* [Regional economics: theory and practice]. 2023;21(9(516)):1653-1670. (In Russ.). DOI: 10.24891/re.21.9.1653. EDN LOVNAT.
 12. Narkevich M.Yu. *Razvitie metodologii sozdaniya sistemy menedzhmenta kachestva metallurgicheskogo predpriyatiya, ekspluatiruyushchego opasnye proizvodstvennye obekty, na osnove prikladnoi tsifrovoi platformy : dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk*. [Development of a methodology for creating a quality management system for a metallurgical enterprise operating hazardous production facilities based on an applied digital platform]. Doctoral dissertation. Magnitogorsk, 2023, 332 p. (In Russ.). EDN DCFSXK.
 13. Narkevich M.Yu., Logunova O.S., Kalandarov P.I., et al. Results of a pilot experiment on monitoring the condition of buildings and structures using unmanned aerial vehicles. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 2nd International Conference on Energetics, Civil and Agricultural Engineering 2021 (ICECAE 2021). Tashkent: IOP Science, 2021, vol 939, p. 012030. DOI: 10.1088/1755-1315/939/1/012030. EDN GBCJUM.
 14. Narkevich M.Yu., Logunova O.S., Kormienko V.D., et al. Quality of materials, products and structures in industrial safety: an empirical basis. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021;19(3):90-101. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-3-90-101. EDN KXQAWF. (In Russ.)
 15. Narkevich M.Yu., Logunova O.S. Harmonization of basic and digital indicators of the compliance of hazardous production facilities with a specified technical condition. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Cherepovets State University]. 2023;(3(114)):31-46. (In Russ.). DOI: 10.23859/1994-0637-2023-3-114-3. EDN EUCCMC.
 16. Kozlova A.E., Narkevich M.Yu., Logunova O.S., Shakhmaeva K.E. Visualization elements for the inspection of hazardous production facilities using an unmanned aerial vehicle. *Nauchnaya vizualizatsiya* [Scientific visualization]. 2023;15(2):113-124. (In Russ.). DOI: 10.26583/sv.15.2.10. EDN NLDVKD.
 17. Logunova O.S., Kabanova V.V., Narkevich M.Yu., Kormienko V.D. Software for automated detection and assessment of damage to building joints. *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems]. 2023;(3):474-485. (In Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.143.474-485. EDN KQTPUX.
 18. Narkevich M.Yu., Logunova O.S., Zlydarev N.V., et al. Algorithmic and software support for a Module for identifying typical objects in images of industrial buildings. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical engineering systems and complexes]. 2024;(2(63)):80-89. (In Russ.). DOI: 10.18503/2311-8318-2024-2(63)-80-89. EDN ECNDMP.

Поступила 07.05.2026; принята к публикации 16.09.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 07/05/2026; revised 16/09/2026; published 30/09/2026

Тулупов Олег Николаевич – профессор, доктор технических наук, профессор кафедры технологий обработки материалов, проректор по научной и инновационной работе, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: o.tulupov@mail.ru

Черяпкин Андрей Федорович – директор по охране труда, промышленной безопасности и экологии, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», Магнитогорск, Россия.

Наркевич Михаил Юрьевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства, директор научно-исследовательского института «Промбезопасность», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: narkevich_mu@mail.ru. ORCID 0000-0001-6608-8293

Логунова Оксана Сергеевна – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: logunova66@mail.ru. ORCID 0000-0002-7006-8639

Наркевич Анна Михайловна – студент кафедры вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: narkevich.am@gmail.com. ORCID 0009-0001-4157-2326

Логунова Полина Сергеевна – студент кафедры металлургии и химических технологий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: polina-logunova.2006@mail.ru. ORCID 0009-0006-8217-2691

Oleg N. Tulupov – Professor, DrSc (Eng.), Professor of the Department of Materials Processing Technologies, Vice-Rector for Research and Innovation, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: o.tulupov@mail.ru

Andrey F. Cheryapkin – Director for Labor Protection, Industrial Safety and Ecology,
PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia.

Mikhail Yu. Narkevich – DrSc (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Industrial and Civil Engineering, Director of the Research Institute “Industrial Safety”,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: narkevich_mu@mail.ru. ORCID 0000-0001-6608-8293

Oksana S. Logunova – DrSc (Eng.), Professor,
Head of the Department of Computer Engineering and Programming,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia
Email: logunova66@mail.ru. ORCID 0000-0002-7006-8639

Anna M. Narkevich – Student of the Department of Computer Engineering and Programming,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: narkevich.am@gmail.com. ORCID 0009-0001-4157-2326.

Polina S. Logunova – Student of the Department of Metallurgy and Chemical Technologies,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia
Email: polina-logunova.2006@mail.ru. ORCID 0009-0006-8217-2691



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 005.63
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-123-129

УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ В СИСТЕМЕ МЕНЕДЖМЕНТА ПРЕДПРИЯТИЯ

Казанцева Т.В.¹, Соколова Т.Б.¹, Казанцева Н.К.¹, Михеева С.В.¹, Полякова М.А.²

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

²Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Постановка задачи. Управление качеством на предприятиях наряду с обеспечением выпуска продукции, соответствующей заявленным требованиям, включает также аспекты, сопряженные с реализацией цепочек поставок. Для обеспечения управляемости по всем возможным факторам, оказывающим влияние на качество продукции и процессов, применяют управление рисками, которые возникают на разных стадиях жизненного цикла продукции. Управление рисками в системе менеджмента предприятия международных стандартов ИСО 9000, ИСО 14000, ИСО 27000, ИСО 45000, ИСО 28000 предполагает влияние неопределенности на достижение поставленных целей по обеспечению качества продукции и процессов. **Цель работы.** Обеспечить упорядочение и оптимизацию процесса управления рисками для предприятия. **Используемые методы.** Системный анализ рисков на основе количественной и качественной информации с выработкой управленческих решений для системы менеджмента. **Новизна.** Для управления рисками в системе менеджмента предприятия авторами предложена двухуровневая модель системы управления рисками. Во-первых, авторами разработана база данных «Управление рисками в системе менеджмента организации», которая включает следующие основные элементы: пользователи, риски, предприятия-партнеры, выработка мероприятий по управлению рисками, оценка эффективности принятых управленческих решений. Во-вторых, адаптация электронно-цифровой среды предприятия для обработки рисков и оценки эффективности воздействия на риск, которая осуществляется с помощью специального Приложения. **Результат.** Система управления рисками на предприятии предназначена для решения следующих основных задач: формирование базы рисков отдельного предприятия; идентификация рисков предприятия; оценка вероятности риска и категории ущерба при его наступлении; обработка рисков с помощью различных методов (устранение, сокращение, разделение и др.); оценка эффективности воздействия на риски в соответствии с выбранными показателями. **Практическая значимость.** Использование базы данных позволит предприятиям разработать, модифицировать и в дальнейшем актуализировать по мере необходимости перечень рисков и их владельцев, комплекс мероприятий по обработке рисков, наиболее соответствующий потребностям, целям и возможностям конкретного предприятия.

Ключевые слова: система менеджмента, риск, база данных, управление рисками, неопределенность

© Казанцева Т.В., Соколова Т.Б., Казанцева Н.К., Михеева С.В., Полякова М.А., 2026

Для цитирования

Управление рисками в системе менеджмента предприятия / Казанцева Т.В., Соколова Т.Б., Казанцева Н.К., Михеева С.В., Полякова М.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 123-129. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-123-129>



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

RISK MANAGEMENT IN AN ENTERPRISE MANAGEMENT SYSTEM

Kazantseva T.V.¹, Sokolova T.B.¹, Kazantseva N.K.¹, Mikheeva S.V.¹, Polyakova M.A.²¹Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Yekaterinburg, Russia²Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Quality management at enterprises, along with ensuring that products are manufactured in compliance with specified requirements, also encompasses aspects associated with the implementation of supply chains. To ensure controllability of all possible factors affecting the quality of products and processes, risk management is applied to risks arising at different stages of the product life cycle. Risk management within an enterprise management system based on international standards ISO 9000, ISO 14000, ISO 27000, ISO 45000, and ISO 28000 implies consideration of the impact of uncertainty on the achievement of established objectives related to ensuring product and process quality. **Objectives.** The research is aimed at streamlining and optimizing the risk management process at an enterprise. **Methods Applied.** Systematic risk analysis based on quantitative and qualitative information, followed by the development of management decisions for the enterprise management system, is used. **Originality.** To manage risks within an enterprise management system, the authors propose a two-level risk management model. First, the authors have developed a database entitled “Risk Management in the Organization’s Management System”, which includes the following key elements: users, risks, partner enterprises, development of risk management measures, and evaluation of the effectiveness of management decisions. Second, the enterprise’s electronic and digital environment is adapted for risk processing and evaluation of the effectiveness of risk treatment using a dedicated application. **Results.** The enterprise risk management system is designed to address the following key tasks: establishing a risk database for an individual enterprise; identifying enterprise risks; assessing risk probability and the damage category associated with its occurrence; treating risks using various methods (avoidance, reduction, sharing, etc.); and evaluating the effectiveness of risk treatment based on selected indicators. **Practical Relevance.** The use of the database will enable enterprises to develop, modify, and subsequently update, as necessary, the list of risks and their owners, as well as a set of risk treatment measures that best correspond to the needs, objectives, and capabilities of a particular enterprise.

Keywords: management system, risk, database, risk management, uncertainty

For citation

Kazantseva T.V., Sokolova T.B., Kazantseva N.K., Mikheeva S.V., Polyakova M.A. Risk Management in an Enterprise Management System. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 123-129. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-123-129>

Введение

Внедрение информационных технологий в процессы управления рисками в настоящее время является одним из трендов развития технологии управления. Управление рисками в системе менеджмента предприятия предполагает ситуацию, когда на предприятии возможно несколько вариантов: действует система менеджмента ИСО 9000, или интегрированная система качества, или несколько различных систем, которые направлены на снижение затрат, повышение качества продукции, улучшение процессов. Любая система качества является платформой для реализации требований по качеству продукции и технологических процессов, требований по экологии, информационной безопасности и охране труда и здоровья. В таких условиях эффективно управление предприятием, основанное на управлении рисками [1–3].

Системный подход в данном случае обеспечивается применением международных стандартов по менеджменту рисков, а также международных стандартов на системы менеджмента: менеджмент каче-

ства (ИСО 9000), экологический менеджмент (ИСО 14000), менеджмент информационной безопасности (ИСО 27000), безопасность труда и охрана здоровья (ИСО 45000), менеджмент безопасности цепи поставок (ИСО 28000). В каждом стандарте из приведенного перечня содержатся требования по управлению рисками [4].

В соответствии с ГОСТ Р ИСО 31000-2019 «Менеджмент риска. Принципы и руководство», риск определяется как следствие влияния неопределенности на достижение поставленных целей. Неопределенность – состояние полного или частичного отсутствия информации, необходимой для понимания события, его последствий и вероятности их наступления. Вследствие наличия неопределенности возможны отклонения от ожидаемого результата или наступление события, как позитивного, так и негативного. При этом риск можно охарактеризовать путем описания возможного события и его последствий, которые рассматриваются в различной комбинации и с соответствующей вероятностью.

Рискология как наука, изучающая риски и методы их управления, имеет богатую историю. На про-

тяжении веков люди искали способы минимизировать неопределенности и предостерегать себя от возможных угроз. В процессе эволюции научного мышления рискология оформилась как самостоятельная дисциплина, учитывающая разнообразные аспекты деятельности человека [8, 9]. Риск, как аспект неопределенности, не имеет однозначного результата, а для возможности управления процессами в такой ситуации необходимо использовать научные подходы, разрабатываемые в рискологии – науке о рисках [5–7].

Цель данного исследования – обеспечить упорядочение и оптимизацию процесса управления рисками для конкретного предприятия.

Материалы и методы исследования

Системный анализ риска включает три взаимосвязанные процедуры: оценку риска, управление риском и информирование о риске. Упорядочение и оптимизация процесса управления рисками системы менеджмента является актуальной задачей для многих предприятий.

Для получения результата по управлению рисками необходимо два принципиальных аспекта:

1. Системный анализ рисков, включающий идентификацию действующих рисков через получение качественной и количественной информации о рисках. В результате системного анализа формируются управленческие решения для системы менеджмента.

2. Наличие электронно-цифровой среды предприятия для реализации управленческих решений системы менеджмента.

Для формирования электронно-цифровой среды предприятия авторами предложена двухуровневая модель системы управления рисками в организации:

- База данных «Управление рисками в системе менеджмента организации».
- Приложение, обеспечивающее потребности предприятия по управлению рисками на основе сформированной базы данных.

Полученные результаты и их обсуждение

В настоящее время разработана база данных «Управление рисками в системе менеджмента организации», которая включает следующие основные блоки: пользователи, риски, системы менеджмента, предприятия-партнеры, процессы, периоды контроля, обработка рисков и оценивание воздействия на риск [10].

Инфологическая модель базы данных приведена на **рис. 1**.

В базе данных предусмотрены следующие типы рисков: внешние; внутренние; риски, связанные с управлением документацией; риски, связанные с процессами интегрированной системы менеджмента; риски, связанные с человеческими ошибками; риски, связанные с реальными потерями. Для оценки вероятности рисков в базе данных выбраны следующие градации: минимально вероятные, маловероятные, вероятные, весьма вероятные, максимально вероятные. При этом используются различные методы: статистические, аналитические, метод экспертных оценок, метод аналогов.

На **рис. 2** приведены скриншоты таблиц «Риски», используемые в базе данных, а на **рис. 3** – скриншот таблицы «РискиДействия».

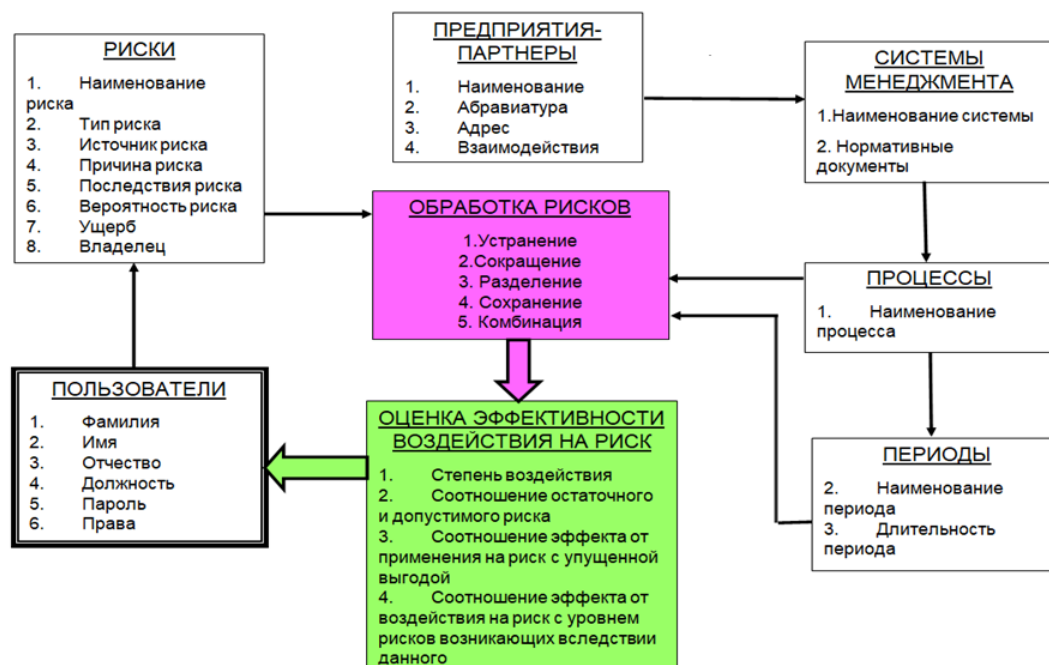


Рис.1. Инфологическая модель базы данных

Fig. 1. Infological model of the database

Скриншот таблицы «Риски» (Risks) в SQL Server Enterprise Manager. В левой панели отображены объекты базы данных, включая таблицы. В правой панели показаны результаты запроса, который возвращает топ-1000 записей из таблицы «Риски».

Запрос (SQLQuery2.sql):

```

SELECT TOP 1000 [ID_Риска],
[НаименованиеРиска],
[ID_ТипаРиска],
[ПричинаРиска],
[РезультатРиска],
[ВероятностьРиска],
[Мероприятия]
FROM [Риски].[dbo].[Риски]

```

Результаты (300 строк):

ID_Риска	НаименованиеРиска	ID_ТипаРиска	ПричинаРиска	РезультатРиска	ВероятностьРиска	Мероприятия
1	Риск 1	10	Причина риска 1	Результат риска 1	10.00	Мероприятие
2	Риск 2	11	Причина риска 2	Результат риска 2	3.00	Мероприятие
3	Риск 3	3	Причина риска 3	Результат риска 3	4.00	Мероприятие
4	Риск 4	7	Причина риска 4	Результат риска 4	2.00	Мероприятие
5	Риск 5	10	Причина риска 5	Результат риска 5	10.00	Мероприятие
6	Риск 6	12	Причина риска 6	Результат риска 6	2.00	Мероприятие
7	Риск 7	12	Причина риска 7	Результат риска 7	3.00	Мероприятие
8	Риск 8	1	Причина риска 8	Результат риска 8	8.00	Мероприятие
9	Риск 9	3	Причина риска 9	Результат риска 9	9.00	Мероприятие
10	Риск 10	11	Причина риска 10	Результат риска 10	7.00	Мероприятие
11	Риск 11	14	Причина риска 11	Результат риска 11	3.00	Мероприятие
12	Риск 12	5	Причина риска 12	Результат риска 12	1.00	Мероприятие
13	Риск 13	4	Причина риска 13	Результат риска 13	7.00	Мероприятие
14	Риск 14	12	Причина риска 14	Результат риска 14	9.00	Мероприятие
15	Риск 15	12	Причина риска 15	Результат риска 15	8.00	Мероприятие
16	Риск 16	3	Причина риска 16	Результат риска 16	6.00	Мероприятие
17	Риск 17	2	Причина риска 17	Результат риска 17	2.00	Мероприятие
18	Риск 18	7	Причина риска 18	Результат риска 18	8.00	Мероприятие
19	Риск 19	8	Причина риска 19	Результат риска 19	9.00	Мероприятие
20	Риск 20	12	Причина риска 20	Результат риска 20	5.00	Мероприятие

Рис. 2. Скриншот таблицы «Риски»
Fig. 2. Screenshot of the “Risks” table

Скриншот таблицы «РискиДействия» (RisksActions) в SQL Server Enterprise Manager. В левой панели отображены объекты базы данных, включая таблицы. В правой панели показаны результаты запроса, который возвращает топ-1000 записей из таблицы «РискиДействия».

Запрос (SQLQuery4.sql):

```

SELECT TOP 1000 [ID_Предприятия],
[ID_Процесса],
[ID_Риска],
[ID_Периода],
[ВероятностьРиска],
[ВероятностьРискаМакс],
[ВероятностьРискаМин],
[ПоследствияРиска],
[ПоследствияРискаМакс],
[ПоследствияРискаМин],
[УровеньРиска],
[ID_Пользователя],
[РискиДействия]
FROM [Риски].[dbo].[РискиДействия]

```

Результаты (499 строк):

ID_Предприятия	ID_Процесса	ID_Риска	ID_Периода	ВероятностьРиска	ВероятностьРискаМакс	ВероятностьРискаМин	ПоследствияРиска	ПоследствияРискаМакс	ПоследствияРискаМин	УровеньРиска	ID_Пользователя	РискиДействия
1	1	30	2	6	10	1						
2	1	109	6	10	10	1						
3	1	289	5	6	10	1						
4	1	3	16	7	9	10	1					
5	1	3	166	5	3	10	1					
6	1	5	124	5	5	10	1					
7	1	5	196	7	2	10	1					
8	1	6	33	5	9	10	1					
9	1	8	158	7	10	10	1					
10	1	10	219	7	5	10	1					
11	1	11	81	2	6	10	1					
12	1	11	94	5	2	10	1					
13	1	11	228	5	1	10	1					
14	1	13	59	1	7	10	1					
15	1	13	141	6	2	10	1					
16	1	13	205	7	10	10	1					
17	1	14	1	6	8	10	1					

Рис. 3. Скриншот таблицы «РискиДействия»
Fig. 3. Screenshot of the “RisksActions” table

В процессе обработки рисков используются такие методы, как устранение рисков, сокращение, разделение, сохранение, а также комбинация различных методов.

Обработка рисков и оценка эффективности воздействия на риск в предлагаемой модели осуществляется с помощью специального Приложения, закрывающего потребности предприятия по управлению рисками. Для оценки эффективности воздействия на риск рассматриваются показатели: степень воздействия на вероятность риска, степень воздействия на последствия риска, соотношение затрат на применение данного воздействия на риск с ожидаемым эффектом, соотношение остаточного и допустимого риска, соотношение эффекта от применения воздействия на риск с упущенной выгодой, соотношение эффекта от воздействия на риск с уровнем рисков, возникающих вследствие данного воздействия. Для получения данных сведений наряду с методами экспертных оценок и методом аналогов используется нечеткая логика, которая позволяет интерпретировать в лингвистических терминах принятие решений в условиях неопределенности. При этом алгоритмы нечеткого вывода различают главным образом по

видам используемых правил, логических операций и разновидности метода дефаззификации [7].

В режиме экранной формы пользователь получает возможность просмотреть информацию по идентификации рисков, оценке вероятности рисков и оценке эффективности воздействия на риск. В базе данных реализованы возможности фильтрации и упорядочения данных.

При использовании фильтра данных пользователю предоставляется возможность выбрать и заполнить критерии для отбора данных из базы.

Использование базы данных «Управление рисками в системе менеджмента организации» позволит организации разработать, модифицировать и в дальнейшем актуализировать по мере необходимости перечень владельцев риска, комплекс мероприятий по обработке риска, наиболее соответствующий потребностям, целям и возможностям организации. На базу данных «Управление рисками в системе менеджмента организации» получено Свидетельство о государственной регистрации № 2025623961 от 22.09.2025 г. [10].

Для системы управления рисками в организации, включающей базу данных и Приложение для управления рисками, можно выделить информационные сущности и атрибуты, представленные в таблице.

Таблица. Информационные сущности, атрибуты и связи между ними базы данных «Управление рисками в системе менеджмента организации»

Table. Information entities, attributes, and relationships between them in the “Risk Management in the Organization’s Management System” database

Сущность	Атрибуты	Примечание
Риск	Идентификатор риска	Уникальный идентификатор
	Название риска	Краткое описание риска
	Описание риска	Подробное описание риска
	Вероятность возникновения	Численное значение
	Воздействие	Численное значение
	Срок	Сроки, в течение которых риск может возникнуть
	Категория	Категория, к которой относится риск
Пользователь	Идентификатор пользователя	Уникальный идентификатор
	Имя	Имя пользователя
	Логин	Уникальное имя пользователя на входе в базы данных
	Пароль	Зашифрованный пароль для аутентификации
	Роль	Роль пользователя в системе
Предприятие	Идентификатор предприятия	Уникальный идентификатор
	Название предприятия	Наименование предприятия
	Адрес	Фактический адрес предприятия
	Контактная информация	Контактные данные: телефон, электронная почта и др.
Мероприятия по управлению рисками	Идентификатор мероприятия	Уникальный идентификатор
	Название мероприятия	Краткое описание мероприятия
	Описание мероприятия	Подробное описание мероприятия
	Дата начала	Дата начала
	Дата завершения	Дата завершения
Связь между рисками и мероприятиями	Идентификатор связи	Уникальный идентификатор связи
	Связи: Риск	Внешний ключ, обеспечивающий связь с риском
	Связи мероприятия	Внешний ключ, обеспечивающий связь с мероприятием

Заключение

Система управления рисками в организации предназначена для решения следующих основных задач:

- формирование базы данных рисков отдельно- го предприятия;
- идентификация рисков отдельного предприя- тия;
- оценка вероятности риска и категории ущер- ба при его наступлении;
- обработка рисков с помощью различных ме- тодов (устранение, сокращение, разделение и др.);
- оценка эффективности воздействия на риски в соответствии с выбранными показателями.

В настоящее время авторами проводится разра- ботка решений по внесению сведений для оценки ве- роятности риска на основе анализа статистических сведений машиностроительного предприятия с ис- пользованием элементов нечеткой логики. С этой це- лью необходимо сформулировать функции принад- лежности отдельных показателей оценки эффективно- сти воздействия на риск, которые определяют степень, с которой конкретное значение входной переменной принадлежит определенному лингвистическому терму, описывающему уровень оценки. Тестирование систе- мы планируется на 3-й квартал 2026 года.

Список источников

1. Смольянинова И.В., Ахмедов А.Э., Шаталов М.А. Комплексный подход к формированию системы ме- неджмента качества предприятия // Территория науки. 2017. № 4. С. 140-145.
2. Клочков А.Е. Интегрированная информационная си- стема управления качеством: современные цифровые решения // Методы менеджмента качества. 2024. № 3. С. 38-43.
3. Васильев В.А. Возможности интеграции средств и методов управления качеством с цифровыми техноло- гиями // Управление качеством и сертификация. 2019. № 10. С. 40-44.
4. Джамолдинова Л.У., Тарамов Ю.Ш. Инструменты и методы управления качеством промышленных пред- приятий // Экономика и управление: проблемы, реше- ния. 2024. Т. 6, № 5. С. 67-73.
5. Магзумова Н.В., Найденова В.В. Опыт управления на предприятиях Японии и возможность его использова- ния в российских условиях // Современная Россия: по- тенциал инновационных решений и стратегические векторы развития. Краснодар: ООО «Издательский Дом – Юг», 2018. С. 121-125.
6. Горбашко Е.А. Цифровые технологии в развитии ме- неджмента качества // Современный менеджмент: проблемы и перспективы. СПб.: Издательство СПбГ- ЭУ, 2023. С. 8-12.

7. Zio E., Baraldi P. Data-driven and model-driven approach- es for digital quality systems // Quality Engineering. 2020. № 32 (4). С. 636-648.
8. Сигал А.В., Бакуленко М.А., Ремесник Е.С. Рисколо- гия. М.: Инфра-М, 2024. 463 с.
9. Ведмидь П.А. Цифровизация процессов СМК // Мето- ды менеджмента качества. 2021. №5. С. 44-49.
10. Свидетельство о государственной регистрации базы данных RU 2025623961. База данных «Управление рисками в системе менеджмента организации» / Т.Б. Соколова, Т.В. Казанцева, Н.К. Казанцева, В.В. Лав- ров, С.В. Ковалькова, О.Ю. Филатова, А.Ю. Пупков; заявка № 2025623587 от 22.08.2025. Дата регистрации в Реестре баз данных 22.09.2025.

References

1. Smolyaninova I.V., Akhmedov A.E., Shatalov M.A. An integrated approach to developing an enterprise quality management system. *Territoriya nauki* [Territory of science]. 2017;(4):140-145. (In Russ.)
2. Klochkov A.E. Integrated quality management information system: modern digital solutions. *Metody menedzhmenta kachestva* [Quality management methods]. 2024;(3):38-43. (In Russ.)
3. Vasiliev V.A. Integration opportunities of facilities and methods of quality management with digital technologies. *Upravlenie kachestvom i sertifikatsiya* [Quality manage- ment and certification]. 2019;(10):40-44. (In Russ.)
4. Dzhamoldinova L.U., Taramov Yu.Sh. Tools and methods of quality management of industrial enterprises. *Ekonomi- ka i upravlenie: problemy, resheniya* [Economics and management: problems and solutions]. 2024;6(5):67-73. (In Russ.)
5. Magzumova N.V., Naidenova V.V. Experience of manag- ing at the enterprises of Japan and the possibility of its use in russian conditions. *Sovremennaya Rossiya: potentsial innovatsionnykh resheniy i strategicheskie vektory razvitiya* [Modern Russia: the potential for innovative solutions and strategic development vectors]. 2018;121-125. (In Russ.)
6. Gorbashko E.A. Digital technologies in quality manage- ment development. *Sovremennyyi menedzhment: problemy i perspektivy* [Modern management: problems and pro- spects]. Saint Petersburg: Publishing House of The Saint Petersburg University of Economics. 2023;8-12. (In Russ.)
7. Zio E., Baraldi P. Data-driven and model-driven approach- es for digital, Quality Engineering. 2020;(32(4)):636-648.
8. Sigal A.V., Bakulenko M.A., Remesnik E.S. *Riskologiya* [Riskology]. Moscow: Infr-M, 2024, 463 p. (In Russ.)
9. Vedmid P.A. Digitalization of the qms processes and product life cycle management. *Metody menedzhmenta kachestva* [Quality management methods]. 2021;(5):44-49. (In Russ.)
10. Sokolova T.B., Kazantseva T.V., Kazantseva N.K., Lavrov V.V., Kovalkova S.V., Filatova O.Yu., Pupkov A.Yu. *Baza dannykh «Upravlenie riskami v sisteme menedzhmenta organizatsii»* [Database “Corporate risk management system”]. Certificate of State Registration of Database RU, no. RU2025623961, 2025.

Поступила 17.03.2026; принята к публикации 14.04.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 17/03/2026; revised 14/04/2026; published 30/09/2026

Казанцева Татьяна Владимировна – кандидат технических наук,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.
Email: t.v.kazantseva@urfu.ru. ORCID 0000-0001-7051-614X

Соколова Татьяна Борисовна – кандидат педагогических наук, доцент,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.
Email: t.b.sokolova@urfu.ru. ORCID 0000-0002-4504-1215

Казанцева Надежда Константиновна – кандидат технических наук, доцент,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.
Email: n.k.kazantseva@urfu.ru. ORCID 0000-0001-9430-9604

Михеева Светлана Викторовна – кандидат экономических наук,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.
Email: s.v.mikheeva@urfu.ru.

Полякова Марина Андреевна – доктор технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: m.polyakova@magtu.ru. ORCID 0000-0002-1597-8867

Tatiana V. Kazantseva – PhD (Eng.),
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Email: t.v.kazantseva@urfu.ru. ORCID 0000-0001-7051-614X

Tatiana B. Sokolova – PhD (Eng.), Associate Professor,
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Email: t.b.sokolova@urfu.ru. ORCID 0000-0002-4504-1215

Nadezhda K.Kazantseva – PhD (Eng.), Associate Professor,
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Email: n.k.kazantseva@urfu.ru. ORCID 0000-0001-9430-9604

Svetlana V. Mikheeva – PhD (Eng.),
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Email: s.v.mikheeva@urfu.ru.

Marina A. Polyakova – DrSc (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: m.polyakova@magtu.ru. ORCID 0000-0002-1597-8867

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 332.05
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-130-135



ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ ИНТЕГРАЦИИ ESG-СТРАТЕГИИ И БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ

Евлосева М.В., Конюхов В.Ю., Опарина Т.А.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Отечественная предпринимательская экосистема под воздействием внешних факторов (ограничений) была вынуждена сместить ориентиры от глобальных целей к адаптивной динамике, в которой центром стала оперативная устойчивость предприятий. Однако данный подход требует постоянных финансовых потоков и модернизации бизнес-моделей для способности предприятий управлять неопределенностями. ESG-стратегия является инструментом управления системными рисками и повышения адаптивности бизнес-процессов. В связи с этим целью исследования является анализ и обоснование применения ESG-стратегии при повышении устойчивости промышленных предприятий. Для повышения вариативности предприятий в условиях неопределенности при применении статистических и аналитических методов авторами была модернизирована стандартная бизнес-модель, состоящая из девяти последовательных блоков. Она включает все бизнес-процессы организации, в том числе и различные финансовые инструменты. Предложенный подход обеспечивает структурированную, поэтапную схему минимизации рисков в условиях изменчивой среды. Применение предлагаемого авторами подхода позволит проводить комплексный анализ данных, выявлять взаимосвязи между целями устойчивого развития и бизнес-процессами и строить верифицируемые модели ESG-рейтингов, что критически важно для принятия решений инвесторами и руководством. Успешное внедрение и использование ESG-стратегии неразрывно связано с достижением целей устойчивого развития, а также стандартизацией и техническим регулированием, которое обеспечивает сопоставимость данных, предотвращает сбои и повышает доверие к отчетности. Реализация ESG-стратегии в рамках интегрированной бизнес-модели дает организациям возможность их непрерывного совершенствования, гибкости бизнес-процессов и достижения более высокого уровня устойчивости, предоставляя значительные преимущества на современном макроэкономическом рынке.

Ключевые слова: устойчивое развитие, система менеджмента качества, бизнес-модель, промышленные предприятия, заинтересованные стороны

© Евлосева М.В., Конюхов В.Ю., Опарина Т.А., 2026

Для цитирования

Евлосева М.В., Конюхов В.Ю., Опарина Т.А. Повышение устойчивости промышленных предприятий в условиях неопределенности при интеграции ESG-стратегии и бизнес-процессов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 130-135. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-130-135>



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

ENHANCING THE RESILIENCE OF INDUSTRIAL ENTERPRISES UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY THROUGH THE INTEGRATION OF ESG STRATEGY AND BUSINESS PROCESSES

Evloeva M.V., Konyukhov V.Yu., Oparina T.A.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Under the influence of external factors (constraints), the domestic entrepreneurial ecosystem has been forced to shift its focus from global objectives toward adaptive dynamics, with the operational resilience of enterprises becoming a central priority. However, this approach requires continuous financial flows and the modernization of business models to enable enterprises to manage uncertainties. An ESG strategy serves as a tool for managing systemic risks and enhancing the adaptability of business processes. Accordingly, the purpose of this study is to analyze and substantiate the application of an ESG strategy to enhance the resilience of industrial enterprises. To increase the adaptability of enterprises under conditions of uncertainty, the authors have modified the standard business model using statistical and analytical methods. The model consists of nine consecutive blocks and encompasses all business processes of an organization, including various financial instruments. The proposed approach provides a structured, step-by-step framework for minimizing risks in a changing environment. The application of the proposed approach makes it possible to conduct a comprehensive analysis of data, identify relationships between sustainable development goals and business processes, and develop verifiable ESG rating models, which is critical for decision-making by investors and management. The successful implementation and use of an ESG strategy are intrinsically linked to the achievement of sustainable development goals, as well as to standardization and technical regulation, which ensure data comparability, prevent disruptions, and increase confidence in reporting. Implementing an ESG strategy within an integrated business model enables organizations to continuously improve, increase the flexibility of business processes, and achieve a higher level of resilience, providing significant advantages in the modern macroeconomic environment.

Keywords: sustainable development, quality management system, business model, industrial enterprises, stakeholders

For citation

Evloeva M.V., Konyukhov V.Yu., Oparina T.A. Enhancing the Resilience of Industrial Enterprises Under Conditions of Uncertainty Through the Integration of ESG Strategy and Business Processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 130-135. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-130-135>

Введение

Современная стратегия устойчивого развития представляет собой не декларативный перечень этических принципов, а структурированный механизм управления долгосрочными рисками и стоимостью капитала. В основе ее функционирования лежит принцип двойной материальности, согласно которому организация обязана учитывать и влияние внешних факторов на свою финансовую устойчивость, и последствия собственной деятельности для окружающей среды и общества. Процесс реализации такой стратегии начинается с интеграции финансовых и нефинансовых показателей в классическую бизнес-модель, что позволяет трансформировать ЦУР 17 в конкретные управленческие принципы.

Возникающие неопределенности, вызванные внешними факторами, создают новые проблемы и риски на пути достижения отечественными предприятиями целей устойчивого развития. Правильно встроенная в бизнес-модель стратегия уменьшает риски, повышает предсказуемость бизнеса и улучшает доступ к ресурсам в условиях изменчивой среды.

ESG-стратегия как составная часть концепции устойчивого развития возникла в международном со-

обществе и является инструментом оценки рисков и устойчивости организаций. В основе ESG лежит понимание того, что экологические аспекты, социальная ответственность и корпоративное управление имеют непосредственное влияние на долгосрочную стоимость бизнеса и его конкурентоспособность. Данная стратегия соответствует большому количеству международных и национальных стандартов, а именно:

- 1-й критерий ESG «Окружающая среда»:
 - ГОСТ Р ИСО 14001-2016;
 - ГОСТ Р ИСО 14004-2017;
 - ГОСТ Р ИСО 14040-2022;
 - ГОСТ Р ИСО 14064-1-2021;
- 2-й критерий ESG «Общество»:
 - ГОСТ Р ИСО 26000-2012;
 - ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001-2021;
 - ГОСТ Р ИСО 45001-2020;
- 3-й критерий ESG «Управление»:
 - ГОСТ Р ИСО 9000-2015;
 - ГОСТ Р ИСО 9001-2015;
 - ГОСТ Р ИСО 9004-2019;
 - ГОСТ Р ИСО 31000-2019;
 - ГОСТ Р ИСО 37001-2025;
 - ГОСТ Р 58139-2024.

В производственном секторе экологический аспект ESG-стратегии работает через внедрение наилучших доступных технологий и переход к экономике замкнутого цикла. Это создает прямую связь между снижением антропогенной нагрузки и операционной эффективностью, поскольку минимизация выбросов и оптимизация ресурсопотребления ведут к сокращению затрат.

Социальный компонент стратегии функционирует как инструмент обеспечения промышленной безопасности и развития человеческого потенциала. Это минимизирует риски кадрового дефицита и снижает текущие затраты.

Корпоративное управление выступает связующим звеном, обеспечивающим прозрачность и подотчетность всей системы. Оно работает через создание специализированных комитетов, внедрение систем цифрового мониторинга KPI и проведение независимой верификации нефинансовой отчетности.

Материалы и методы исследования

Именно через высокое качество организации показывают свои успехи заинтересованным сторонам, включая государственных регуляторов. В рамках реализации целей устойчивого развития акцент смещается на стратегические партнерства, которые позволяют разделять риски с другими участниками рынка.

Устойчивое развитие для российских предприятий – это особенно важная стратегия, так как страна в последние годы сталкивается с рядом проблем (рис. 1) [1].

Как видно из анализа, для отечественных предприятий проблемы системной неопределенности, вызванные внешними факторами, остаются нерешенными, особенно это касается отраслей промышленности, уровень производства которых зависит от качества изделий. За последние пять лет отечественные предприятия значительно сократились (см. таблицу) [4].

Из данных таблицы видно, что с 2021 по 2025 гг. коммерческие предприятия сократились на 2, 25%, ООО сократились почти на 3%, ПАО сократились на 20% и т.д., из чего следует, что глобальные и частные проблемы предприятий не решаются своевременно, бизнес в таких условиях становится непредсказуемым, а технические документы теряют силу. Риск изменения правил в связи с ограничениями и усилением контроля становится дополнительным источником неопределенности, а именно меняются требования к сертификации, закупочные правила и критерии соответствия. Более того, непредсказуемость поставок ведет к росту запасов и увеличению оборотного капитала, одновременно снижая оборачиваемость средств и рентабельность организаций. На уровне рабочих процессов возникают перебои и необходимость быстрой переквалификации кадров, а отток специалистов создает дефицит компетенций в секторах, где требуются узкоспециализированные знания и опыт. Крупные предприятия сталкиваются с дилеммой между избыточными запасами как страховкой и затратами на их содержание. Все эти проблемы снижают конкурентоспособность предприятий. Следовательно, в первую очередь необходимо минимизировать риски, возникающие в условиях неопределенности.

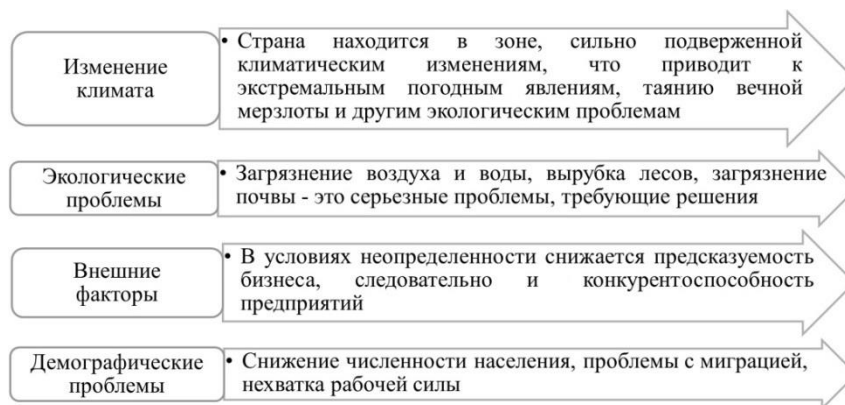


Рис. 1. Вызовы отечественным предприятиям

Fig. 1. Challenges faced by domestic enterprises

Таблица. Динамика сокращения количества отечественных предприятий

Table. Dynamics of the decline in the number of domestic enterprises

Организации	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.	2025 г.	Прирост %
Все	3 272 380	3 257 883	3 248 663	3 264 021	3 198 624	- 2,25
Коммерческие	2 665 237	2 644 555	2 634 479	2 647 333	2 587 776	- 2,91
Общества с ограниченной ответственностью (ООО)	2 585 669	2 562 888	2 553 375	2 566 446	2 507 341	- 3,03
Публичные акционерные общества (ПАО)	6 590	6 155	5 729	5 487	5 264	- 20,12
Муниципальные унитарные предприятия (МУП)	7 109	7 040	6 567	5 248	4 773	- 32,86
Сельскохозяйственные производственные кооперативы (СПК)	5 232	4 973	4 756	4 613	4 491	- 14,16
Прочие	6 363	7 429	7 129	6 743	6 108	- 4,01

За эффективность бизнес-процессов отвечает бизнес-модель организации. Термин «бизнес-модель» имеет несколько определений и основное из них приводится в толковом словаре «Инновационная деятельность». Термины инновационного менеджмента и смежных областей», а именно: это совокупность стандартизированных способов ведения бизнеса, правил ведения этого бизнеса, лежащих в основе стратегии компании, а также критериев оценки его деловых показателей, куда включаются все деловые функции организации [5]. Следовательно, в бизнес-модель входят финансовые, организационные, производственные и иные инструменты, отражающие сложные взаимосвязи и взаимодействия между внутренними компонентами. Бизнес-модель состоит из таких блоков, как: потребительские сегменты; ценностные предложения; каналы сбыта; отношения с клиентами; потоки доходов; ключевые ресурсы; ключевые процессы; ключевые партнеры; структура издержек (рис. 2).



Рис. 2. Стандартная бизнес-модель
Fig. 2. Standard business model

Из схемы видно, что бизнес-модель состоит из девяти блоков, которые заполняются в соответствии с бизнес-процессами организации и являются важными, так как это основная часть стратегического планирования. Данные блоки заполняются посредством выстраивания ряда вопросов и нахождения на них ответов. Однако если стратегическое планирование будет перекликаться с ESG-стратегией, то бизнес станет более предсказуемым.

На практике ESG как система трансформировала инвестиционные стратегии, корпоративную отчетность и требования со стороны крупных инвесторов, создав спрос на прозрачность и на показатели, которые ранее считались вторичными по отношению к финансовым метрикам. Более того, ESG-стратегия отражается в семнадцати целях устойчивого развития (рис. 3).

Для предприятий, ориентированных на экспорт в том числе, значимость ESG остается критичной, поскольку международные партнеры и инвесторы используют ESG-рейтинги при принятии инвестиционных решений и формировании условий финансирования. ESG-рейтинг присваивается в три этапа (рис. 4).



Рис. 3. Тройственная система ESG-стратегии
Fig. 3. Triple ESG strategy system

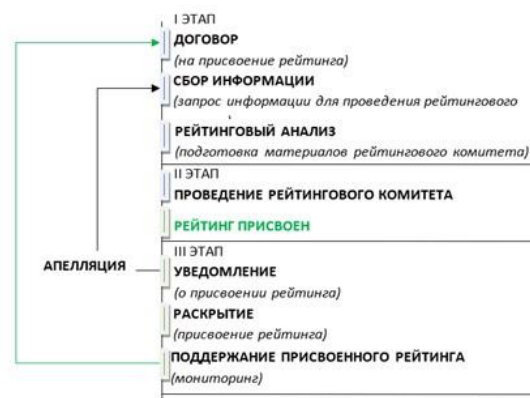


Рис. 4. Процесс присвоения ESG-рейтинга
Fig. 4. ESG rating assignment process

Из схемы видно, что у данного подхода три основных этапа с дополнительными подэтапами. Применяя его, рейтинговые агентства изучают деятельность промышленных предприятий, анализируя широкий спектр показателей, такие как влияние производственных процессов на окружающую среду, выбросы парниковых газов, управление ресурсами, условия труда и права человека, взаимоотношения с сообществами, а также структуру управления, прозрачность и соответствие стандартам корпоративной этики. Если анализировать базу данных рейтинговых компаний, то из данных следует, что ESG-рейтинг сохраняет свои позиции и диктует правила при достижении ЦУР 17 (рис. 5).



Рис. 5. ESG-рейтинг российских предприятий по отраслям экономики

Fig. 5. ESG ratings of Russian enterprises by economic sectors

Проведенное исследование показало, что одна из основных проблем, вызванная посредством цепной реакции, – это разрыв в доступе к критично-важным технологиям и комплектующим, что непосредственно влияет на формирование качества готовых изделий. Согласно стандартам системы менеджмента качества, качество определяется способностью удовлетворять потребителей и преднамеренным или непреднамеренным влиянием на соответствующие заинтересованные стороны, а СМК управляет взаимодействующими процессами и ресурсами, требуемыми для обеспечения ценности и реализации результатов для соответствующих заинтересованных сторон, позволяя высшему руководству оптимизировать использование ресурсов, учитывая долгосрочные и краткосрочные последствия их решений [6]. ESG-стратегия при правильной ее интеграции поспособствует предсказуемости бизнеса в условиях неопределенности.

Полученные результаты и их обсуждение

Эффективное управление неопределенностью требует системного подхода, где стратегическое планирование пересекается с операционной гибкостью и финансовой устойчивостью.

Авторами предлагается трансформация привычных бизнес-моделей путем дополнения их ESG-стратегией, которая отражается в ЦУР 17. Это позволит пересмотреть оценки рисков и приоритеты. В этих условиях неопределенность перестает быть элементом внешней среды и превращается в постоянный компонент управленческой повестки, требующий системных оценок на уровне стратегии, операций и корпоративного управления.

Предложенная авторами схема трансформации бизнес-модели предполагает заполнение блоков в соответствии с ЦУР 17 (рис. 6). Из схемы следует,

что все блоки стандартной бизнес-модели могут заполняться в соответствии с ЦУР 17, а процессы могут выполняться в соответствии с ESG-стратегией. Более того, процессы одного блока могут соответствовать нескольким целям. Также следует отметить, что, кроме решения вышеописанных проблем, данный подход повышает эффективность организаций и поддерживает репутацию.

Заключение

В условиях неопределенности ESG-стратегия выступает гарантом устойчивого развития предприятий, а модернизированная бизнес-модель превращает неопределенность в компонент управленческой повестки, делая процессы менее уязвимыми к внешним факторам. ESG-стратегия способствует минимизации операционных рисков через экологические меры, снижению энергозатрат и управлению отходами.

Таким образом, впервые изучена ESG-стратегия в контексте с бизнес-моделью. Выявлено, что данная стратегия превращает неопределенность из внешней угрозы в управляемый набор действий при условии, если предприятие связывает экологические, социальные и управленческие аспекты с экономическими показателями и интегрирует их в систему управления рисками. Такой подход повышает конкурентоспособность предприятий и отвечает за эффективность таких метрик, как финансовая устойчивость, операционная устойчивость, экологический эффект и др.

Правильные инвестиции повышают производительность и обеспечивают устойчивость критических компетенций. Прозрачная отчетность снижает риски и повышает предсказуемости, а оценка и работа с поставщиками по ESG-критериям стимулирует резервирование цепочек поставок.



Рис. 6. Модернизированная структура бизнес-модели
Fig. 6. The upgraded structure of the business model

Список источников

1. Евлоева М.В. Роль устойчивого развития в планировании производственных мощностей высокотехнологического предприятия // *Качество и жизнь*. 2024. № 3. С. 79-87.
2. Производство высококачественной отечественной продукции как инструмент повышения конкурентоспособности / М.В. Евлоева, П.А. Лонцих, А.В. Федотова и др. // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2025. № 8. С. 81-88.
3. Результативность деятельности промышленных предприятий при применении ESG-критериев и сетецентрической модели / П.А. Лонцих, М.В. Евлоева, А.В. Федотова и др. // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2025. Т. 27. № 1(123). С. 49-55.
4. Интерфакс. Статистика. URL: <https://spark-interfax.ru/statistics> (дата обращения: 14.01.2026).
5. Академик. URL: https://innovative_activities.academic.ru/ (дата обращения: 02.02.2026).
6. ГОСТ Р ИСО 9000:2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. М.: Стандартинформ, 2019. 48 с.
7. ГОСТ Р ИСО 9001:2015. Системы менеджмента качества. М.: Стандартинформ, 2015. 23 с.
8. ГОСТ Р ИСО 9004:2019. Менеджмент качества. Качество организации. Руководство по достижению устойчивого успеха организации. М.: Стандартинформ, 2019. 55 с.
9. ГОСТ Р ИСО 14040:2022. Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 17 с.
10. ГОСТ Р ИСО 31000:2019. Менеджмент риска. М.: Стандартинформ, 2020. 13 с.

References

1. Evloeva M.V. The role of sustainable development in the planning of production capacities of a high-tech enterprise. *Kachestvo i zhizn* [Quality and life]. 2024;(3):79-87. (In Russ.)
2. Evloeva M.V., Lontsikh P.A., Fedotova A.V. et al. Production of high-quality domestic products as a tool to increase competitiveness. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical sciences]. 2025;(8):81-88. (In Russ.)
3. Lontsikh P.A., Evloeva M.V., Fedotova A.V. et al. The effectiveness of industrial enterprises in the application of ESG criteria and a network-centric model. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2025;27(1(123)):49-55. (In Russ.)
4. Interfax. Statistics. Available at: <https://spark-interfax.ru/statistics> (Accessed on January 14, 2026)
5. The Academician. Available at: https://innovative_activities.academic.ru/ (Accessed on February 2, 2026)
6. State standard GOST 9000:2015. Quality Management Systems. Fundamentals and vocabulary. Moscow: Standartinform, 2019, 48 p. (In Russ.)
7. State standard GOST 9001:2015. Quality Management Systems. Moscow: Standartinform, 2015, 23 p. (In Russ.)
8. State standard GOST 9004:2019. Quality management. Quality of an organization. Guidance to achieve sustained success. Moscow: Standartinform, 2019, 55 p. (In Russ.)
9. State standard GOST 14040:2022. Environmental management. Life cycle assessment. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2022, 17 p. (In Russ.)
10. State standard GOST 31000:2019. Risk management. Moscow: Standartinform, 2020. 13 p. (In Russ.)

Поступила 09.03.2026; принята к публикации 14.04.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 09/03/2026; revised 14/04/2026; published 30/09/2026

Евлоева Малика Вахаевна – кандидат технических наук, доцент,
Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
Email: malika-vahaevna2013@yandex.ru. ORCID 0000-0009-6842-9642

Конюхов Владимир Юрьевич – кандидат технических наук, доцент,
Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
Email: konyuhovvy@ex.istu.edu. ORCID 0000-0001-9137-9404

Опарина Татьяна Александровна – ассистент,
Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
Email: martusina2@yandex.ru. ORCID 0000-0002-9062-6554

Malika V. Evloeva – PhD (Eng.), Associate Professor,
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: malika-vahaevna2013@yandex.ru. ORCID 0000-0009-6842-9642

Vladimir Yu. Konyukhov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: konyuhovvy@ex.istu.edu. ORCID 0000-0001-9137-9404

Tatyana A. Oparina – Assistant,
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: martusina2@yandex.ru. ORCID 0000-0002-9062-6554



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 531.7:311
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-136-142

УСТАНОВЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ТОЧНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ПРОЦЕССА

Сойко А.И.¹, Савельева Д.А.¹, Денисова Я.В.²

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технологический университет-КХТИ, Казань, Россия

Аннотация. В статье рассмотрен подход к назначению требований к точности средств измерений с учетом индексов производственных процессов. Существующий нормативный подход (ГОСТ 8.051-81), устанавливающий допускаемую погрешность $\delta_{изм}$ в зависимости от поля допуска IT, не учитывает фактическую стабильность технологического процесса, характеризуемую индексом воспроизводимости C_p . Это приводит к несогласованности с требованиями руководства по анализу измерительных систем (MSA) и национальных стандартов, требующих оценки пригодности измерительных процессов через показатель %GRR, зависящий от соотношения погрешности измерений и изменчивости процесса. Применен метод статистического моделирования, основанный на анализе и формализации взаимосвязей между реальной ($\sigma_{тех}$) и наблюдаемой (σ_0) изменчивостью, индексами воспроизводимости C_p , допускаемой погрешностью измерения $\delta_{изм}$, полем допуска IT и показателем %GRR. В ходе исследования получены количественные зависимости, показывающие, как условия приемлемости измерительного процесса ($\%GRR \leq 10\%, \leq 30\%$) соотносятся с вероятностями ошибок первого (m – ложная браковка) и второго (n – пропуск брака) рода для процессов с различной стабильностью ($C_p = 0,8-1,5$). Выявлены критические значения $\delta_{изм}/IT$, при которых наблюдаемый индекс C_p перестает быть объективной оценкой реальных возможностей процесса. Разработаны номограммы и алгоритмы, позволяющие по заданным параметрам процесса (C_p , IT) и допустимым рискам определить требуемую точность средств измерений. Предложенные подходы и алгоритмы предоставляют инженерам-технологам и метрологам инструмент для экономически обоснованного выбора измерительного оборудования по точности, оценки рисков контроля и планирования мероприятий по совершенствованию технологических процессов и систем метрологического обеспечения. Результаты могут быть использованы при актуализации нормативной документации и внедрении статистических методов управления качеством.

Ключевые слова: выбор средств измерений, допускаемая погрешность, GRR, воспроизводимость процесса, статистическое моделирование, оптимизация метрологического обеспечения, риски контроля

© Сойко А.И., Савельева Д.А., Денисова Я.В., 2026

Для цитирования

Сойко А.И., Савельева Д.А., Денисова Я.В. Установление требований к точности средств измерений на основе статистического моделирования показателей воспроизводимости процесса // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 136-142. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-136-142>



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

ESTABLISHING REQUIREMENTS FOR THE ACCURACY OF MEASURING INSTRUMENTS BASED ON STATISTICAL MODELING OF PROCESS REPRODUCIBILITY INDICES

Soyko A.I.¹, Savelyeva D.A.¹, Denisova Ya.V.²

¹Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia

²Kazan National Research Technological University-KNRTU, Kazan, Russia

Abstract. The paper considers an approach to establishing requirements for the accuracy of measuring instruments with due regard to production process capability indices. The existing regulatory approach (GOST 8.051-81), which specifies the permissible measurement error δ_{meas} depending on the tolerance field IT, does not take into account the actual stability of the technological process characterized by the process capability index C_p . This results in inconsistency with the requirements of Measurement Systems Analysis (MSA) guidelines and national standards, which require the suitability of measurement processes to be assessed using the %GRR indicator, which depends on the ratio between measurement error and process variability. A statistical modeling method has been applied based on the analysis and formalization of the relationships between actual (σ_{tech}) and observed (σ_o) variability, the process capability index C_p , permissible measurement error δ_{meas} , tolerance field IT, and the %GRR indicator. The study has established quantitative relationships showing how the measurement process acceptability criteria (%GRR $\leq 10\%$, $\leq 30\%$) correspond to the probabilities of Type I (m – false rejection) and Type II (n – failure to detect a nonconforming item) errors for processes with different levels of stability ($C_p = 0.8-1.5$). Critical values of the $\delta_{\text{изм}}/IT$ ratio have been identified at which the observed C_p index ceases to provide an objective assessment of the actual process capability. Nomograms and algorithms have been developed that make it possible to determine the required accuracy of measuring instruments based on specified process parameters (C_p , IT) and acceptable risks. The proposed approaches and algorithms provide process engineers and metrologists with a tool for the economically justified selection of measuring equipment in terms of accuracy, assessment of inspection risks, and planning of measures to improve technological processes and metrological assurance systems. The results can be used to update regulatory documentation and implement statistical quality control methods.

Keywords: measuring instrument selection, permissible measurement error, GRR, process reproducibility, statistical modeling, optimization of metrological assurance, inspection risks

For citation

Soyko A.I., Savelyeva D.A., Denisova Ya.V. Establishing Requirements for the Accuracy of Measuring Instruments Based on Statistical Modeling of Process Reproducibility Indices. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 136-142. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-136-142>

Введение

В условиях цифровой трансформации производства и ужесточения требований к качеству продукции возникают две противоречивые ситуации. С одной стороны, технологические процессы должны обеспечивать стабильно высокую воспроизводимость ($C_p \geq 1,33$), с другой – существующие требования к средствам измерений (СИ) часто вносят значительную погрешность, искажая реальную картину. В результате этого некорректная оценка способности процесса приводит либо к принятию негодных изделий (риск потребителя α), либо к необоснованному браку годной продукции (риск производителя β).

В стандарте [1] установлены базовые требования, регламентирующие допустимую погрешность измерения $\delta_{\text{изм}}$ в диапазоне от 20 до 35% от поля допуска на изготовление (IT) и качества. Однако он определяет минимальные требования к точности измерений, которые могут быть недостаточными для современного производства. Так, требования к погрешности СИ в зависимости от фактической воспроиз-

водимости технологического процесса C_p могут быть различными. Кроме того, применение одного и того же соотношения $\delta_{\text{изм}}/IT$ для процессов с $C_p = 0,8$ и $C_p = 1,67$ приводит к принципиально разным уровням риска.

Для обеспечения конкурентоспособности и соответствия международным стандартам на практике нашли применение более строгие требования MSA или модифицированные критерии, основанные на статистическом анализе воспроизводимости процесса (%GRR) [2, 3]. Однако эти требования на практике разрозненны и не позволяют установить объективную взаимосвязь между точностью процесса (C_p), точностью измерений ($\delta_{\text{изм}}/IT$, %GRR), наблюдаемыми показателями воспроизводимости (C_{po}) и вероятностями ошибок I и II рода (α , β). Решение такой задачи позволит обоснованно при выборе СИ обеспечивать баланс между стоимостью измерительного оборудования, операционными потерями от ошибочных решений и требуемым уровнем качества, выходя за рамки пассивного соблюдения нормативных требований.

Выбор между этими требованиями зависит от целей контроля, например, для формального приемочного контроля достаточно ГОСТ 8.051-81, для эффективного управления процессом необходим MSA с оценкой и снижением погрешности измерений (табл. 1). Для современного производства актуальным является интеграция обоих подходов с приоритетом на MSA для критичных характеристик.

Таблица 1. Сравнительный анализ требований к оценке погрешности измерений
Table 1. Comparative analysis of requirements for the assessment of measurement error

Критерий	Требования стандарта [1]	Требования к измерительному процессу (MSA) [2, 3]
Цель	Обеспечение единства измерений при приемочном контроле	Пригодность для SPC
Метод	Таблицы абсолютных значений из соотношения $\delta_{изм}/IT$	Статистический анализ %GRR
Условия применимости	$\delta \leq (0,2-0,35) \cdot IT$ в зависимости от качества	Установление зон приемлемости процесса %GRR $\leq (10-30) \%$
Учет процесса	Через качество	Через общую изменчивость или допуск
Ошибки контроля	Таблицы значений m, n, c через $A_{мет(с)}$	Расчет α, β с учетом индексов $C_p, (C_{pk})$
Экономические потери	Не учитываются в явном виде	Учет потерь от ошибок

Целью исследования является разработка подхода для установления оптимальных, экономически обоснованных требований к точности средств измерений, обеспечивая комплексный анализ взаимосвязи реальной воспроизводимости технологического процесса (C_p), погрешности измерений ($\delta_{изм}/IT$, %GRR) и вероятностей ошибочных решений. Данное исследование послужит основой для выбора СИ, которое минимизирует совокупные издержки контроля как при соблюдении требований [1], так и при необходимости достижения более высоких стандартов, предписанных требованиями MSA [2, 3].

Требования к допускаемой погрешности измерений

Максимальная допускаемая погрешность измерения – максимальное значение погрешности измерения (без учета знака), разрешенное спецификацией или нормативными документами для данного измерения [4].

В литературе большое внимание уделяют возможности установления такой погрешности, исходя из заданной вероятности отнесения изделий к неправильно забракованным m и неправильно принятым n [5-8]. На основе аппарата теории вероятностей известны формулы и построены графики, устанавливающие зависимость значений m и n от соотношений между погрешностью измерений, параметрами технологического процесса и допуском на изготовление IT .

В качестве количественной оценки погрешности измерений в [1] используется величина среднего квадратического отклонения погрешности измерения $\sigma_{мет}$ (по тексту статьи – $\sigma_{изм}$), а в качестве количественной оценки качества контролируемого процесса – отношение $IT/\sigma_{тех}$, где $\sigma_{тех}$ – среднее квадратическое отклонение контролируемого параметра. Данное отношение может быть выражено через потенциальную способность процесса или индекс воспроизводимости C_p [9]:

$$C_p = \frac{IT}{6 \cdot \sigma_{тех}}. \quad (1)$$

Основной показатель пригодности измерительного процесса – сходимость и воспроизводимость (%GRR), приведенный в процентах относительно допуска IT , определяет процент вклада дисперсии измерений в общую дисперсию и показывает долю разброса, вызванного «шумом» измерений [2, 3]. Так, показатель %GRR $\leq 10\%$ является приемлемым, условно приемлемым при $10\% < \%GRR \leq 30\%$, высокий %GRR $> 30\%$ означает, что измерения не обладают достаточной чувствительностью для обнаружения изменений процесса, что приводит к завышенной оценке разброса σ , заниженной оценке индекса воспроизводимости C_p , а также неспособности эффективно контролировать процесс в реальном времени, увеличивая ошибки ложного брака α (обозначение n в [1]) и пропуска брака β (обозначение m в [1]).

Таким образом, ГОСТ 8.051-81 задает предельную допускаемую погрешность измерения, а MSA предоставляет подходы для диагностики и управления составляющими этой погрешности. Для высокостабильных процессов (с высокими индексами C_p) применение только требований ГОСТ 8.051-81 может привести к выбору СИ с формально допустимой, но слишком большой погрешностью, делающей систему контроля неэффективной. Поэтому необходимо использовать требование ГОСТ 8.051-81 как обязательный базовый уровень, а MSA – как инструмент для обеспечения того, что выбранное СИ способно адекватно оценивать конкретный процесс с его уровнем изменчивости. Сравнение требований точности к СИ при контроле деталей с учетом требований [1-3] приведено на рис. 1.

Наблюдаемая изменчивость процесса σ_o определяется как

$$\sigma_o = \sqrt{\sigma_{тех}^2 + \sigma_{изм}^2}, \quad (2)$$

где $\sigma_{тех}$ – реальная изменчивость процесса (точность техпроцесса [1]); $\sigma_{изм}$ – изменчивость измерительного процесса (прибора), связанная с индексом сходимости и воспроизводимости прибора (GRR),

$$\sigma_{изм} = \frac{IT \cdot GRR}{6} = \frac{IT \cdot \%GRR}{6 \cdot 100}, \quad (3)$$

где %GRR – значение GRR относительно допуска IT , %.

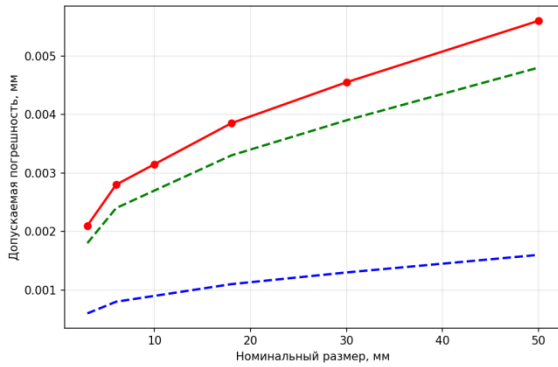


Рис. 1. Сравнение абсолютных значений требований к точности, установленных:

— ГOST 8.051-81; — MSA (%GRR ≤ 10%);
— MSA (%GRR ≤ 30%)

Fig. 1. Comparison of the absolute values of accuracy requirements established by:

— GOST 8.051-81; — MSA (%GRR ≤ 10%);
— MSA (%GRR ≤ 30%)

Наблюдаемую изменчивость процесса σ_0 также можно выразить через наблюдаемый индекс воспроизводимости C_{p0} :

$$\sigma_0 = \frac{IT}{6 \cdot C_{p0}}, \quad (4)$$

Для достижения требуемого значения индекса C_p необходимо выполнение следующего условия $C_{p0} \geq C_p$ или

$$\frac{IT}{6 \cdot \sqrt{\sigma_{\text{тех}}^2 + \sigma_{\text{изм}}^2}} \geq C_p. \quad (5)$$

Требование к выбору СИ будем строить из условия

$$\sigma_{\text{изм}} \leq \sqrt{\sigma_0^2 - \sigma_{\text{тех}}^2}. \quad (6)$$

Используя связь изменчивости процесса с ее индексами, можно записать

$$\sigma_{\text{изм}} \leq IT \sqrt{\left(\frac{1}{6 \cdot C_p}\right)^2 - \left(\frac{1}{6 \cdot C_{pA}}\right)^2}. \quad (7)$$

Реальная изменчивость процесса $\sigma_{\text{тех}}$ может быть выражена через реальный индекс воспроизводимости процесса C_{pA} :

$$\sigma_{\text{тех}} = \frac{IT}{6 \cdot C_{pA}}. \quad (8)$$

Реальный индекс воспроизводимости процесса C_{pA} согласно [3] определяется как

$$C_{pA} = \frac{C_{p0}}{\sqrt{1 - (GRR \cdot C_{p0})^2}}. \quad (9)$$

Для стабильных процессов оценить погрешность измерения можно как

$$\delta_{\text{изм}} = 3 \cdot \sigma_{\text{изм}}. \quad (10)$$

Подставляя $\sigma_{\text{изм}}$ из формулы (10) в (7) и используя отношение допуска к технологическому отклонению $k = \frac{IT}{\sigma_{\text{тех}}}$ [1], путем несложных преобразований можно получить условие выбора СИ:

$$\frac{\delta_{\text{изм}}}{IT} \leq 3 \sqrt{\left(\frac{1}{6 \cdot C_p}\right)^2 - \left(\frac{1}{k}\right)^2}. \quad (11)$$

Для установления связи между GRR и $\delta_{\text{изм}}/IT$ в предположении нормального распределения при уровне доверия 99,73% можно воспользоваться

$$\frac{\delta_{\text{изм}}}{IT} = \frac{3 \cdot \sigma_{\text{изм}}}{IT} = \frac{3 \cdot IT \cdot GRR}{6 \cdot IT} = \frac{GRR}{2}. \quad (12)$$

Статистическое моделирование исследования погрешности измерений с учетом оценки индекса воспроизводимости технологического процесса и рисков ошибочных решений осуществлялось методом Монте-Карло. Моделируется $N = 10^6$ деталей с различными реальными размерами, распределенных по нормальному закону с центром, соответствующим середине поля допуска, и реальной изменчивостью процесса $\sigma_{\text{тех}}$. К каждому реальному размеру добавляется погрешность измерения со средним квадратическим отклонением $\sigma_{\text{изм}}$. Наблюдаемый размер сравнивается с границами допуска и формируются вероятности ошибок I и II рода (α , β). В процессе экспериментов варьируются параметры C_{pA} от 0,8 до 2,0 и %GRR – от 5 до 60 %.

Минимальное условие достижимости по формуле (11) может быть получено при условии $k \geq 6 \cdot C_p$. Если принять $k = 8$, то $\delta_{\text{изм}}/IT$ составит 2,6% от IT . Индекс сходимости и воспроизводимости прибора (%GRR) согласно (12) составит 5,2%, что удовлетворяет требованиям к измерительному процессу (MSA). Чтобы обеспечить %GRR ≤ 10%, необходимо $k \leq 8,05$, и выбирать $\delta_{\text{изм}}/IT \leq 5\%$. При $k > 8,7$ отношение $\delta_{\text{изм}}/IT$ увеличивается и для удовлетворения требованию MSA (%GRR ≤ 30%) необходимо обеспечить $\delta_{\text{изм}}/IT \leq 15\%$ (рис. 2). Зона на номограмме, расположенная ниже штрихпунктирной линии, условиям выбора СИ не удовлетворяет ($k < 6 \cdot C_p$).

В процессе моделирования были выделены четыре зоны, определяющие отношения $\delta_{\text{изм}}/IT$, суммарная вероятность ошибок I и II рода при этом показана для случая $C_{pA} = 1,33$ (рис. 3):

а) более 20 % – зона, в которой возникают высокие ошибки принятия неправильных решений. В данном случае погрешность «съедает» 20% от допуска на размер IT . Поскольку измерения дают лишь грубую

оценку, экономически нецелесообразно использовать точные СИ (например, штангенциркуль с погрешностью $\delta_{\text{СИ}} = 0,1$ мм для допусков не более 0,5 мм);

б) от 10 до 20% – зона, определяющая баланс между точностью и стоимостью измерений. Приемлемо для большинства машиностроительных деталей, контроль может осуществляться средствами средней точности с суммарной ошибкой контроля от 2 до 5 % (например, микрометр с погрешностью $\delta_{\text{СИ}} = 0,01$ мм для допусков 0,05–0,10 мм);

в) от 5 до 10% – зона для перехода к точным измерениям критически важных параметров. Использование дорогих СИ и квалифицированного персонала позволяют повысить точность и достоверность результатов, снижая суммарные ошибки контроля до 2% (например, индикаторы многооборотные $\delta_{\text{СИ}} = 0,005$ мм для допуска 0,05 мм);

г) менее 5% – зона, определяющая требования MSA (%GRR < 10%), предполагает использование СИ высокой точности, значительных затрат на их обслуживание и поверку, суммарная ошибка контроля не превышает 1%.

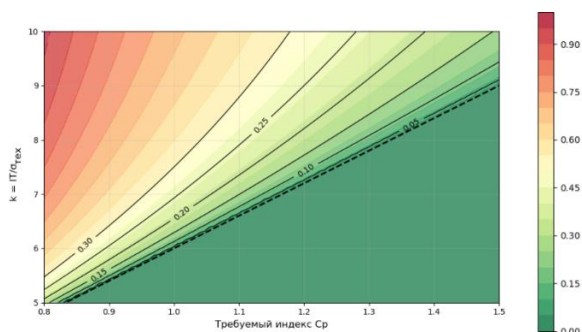


Рис. 2. Номограмма с изолиниями $\delta_{\text{изм}}/IT$:

— — — линия $k = 6 \cdot C_p$

Fig. 2. Nomogram with isolines δ_{mes}/IT :

— — — line $k = 6 \cdot C_p$

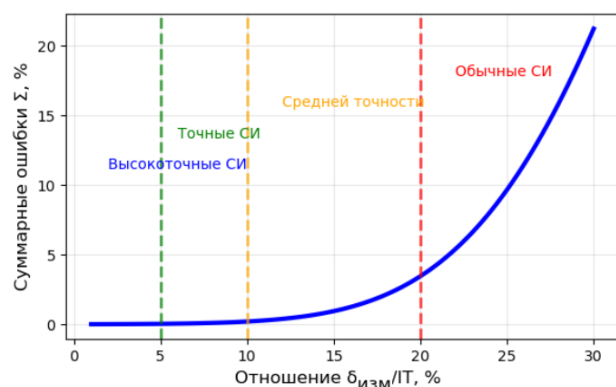


Рис. 3. Влияние точности выбранного СИ на ошибки контроля (при $C_{pA} = 1,33$)

Fig. 3. Effect of the accuracy of the selected measuring instrument on inspection errors (at $C_{pA} = 1.33$)

С учетом роста уровня стабильности технологического процесса, характеризуемого индексом вос-

производимости C_p , ужесточаются требования к точности СИ (табл. 2). Для нестабильных процессов неэффективно использовать высокоточные СИ, поскольку сначала нужно улучшать технологию. Для стабильных процессов необходимы точные СИ, чтобы эффективно контролировать малые вариации и минимизировать риски ошибочных решений.

Таблица 2. Отношение $\delta_{\text{изм}}/IT$ в зависимости от качества производственного процесса

Table 2. Ratio δ_{mes}/IT depending on the quality of the production process

Качество процесса	C_p	k_{min}	$\delta_{\text{изм}}/IT$	Рекомендация
Нестабильный процесс, грубые измерения	0,50	3,0	$> 0,2$	Улучшить процесс, затем измерения
Минимально приемлемый процесс	1,00	6,0	0,1–0,2	Средняя точность СИ (микрометры)
Стабильный процесс	1,33	8,0	0,05–0,15	Точные СИ (индикаторы, оптиметры)
Высококачественный процесс	1,5	9,0	0,03–0,10	Точные и высокоточные СИ

Пример 1. Известны требования к контролю размера отверстия $\varnothing 45H12^{(+0,25)}$. Предположим, индекс воспроизводимости процесса производства $C_p = 1,0$, смещение отсутствует. По ГОСТ 8.051-81 допускаемая погрешность $\delta_{\text{изм}} = 50$ мкм, что составляет 20% от IT . Число неправильно принятых деталей в процентах от общего числа измеренных $m = (3,1–3,5)\%$, число неправильно забракованных деталей в процентах от общего числа измеренных $n = (4,50–4,75)\%$, вероятностная величина выхода размера за предельные у неправильно принятых деталей $c = 0,14 \cdot IT$. Согласно [10], контроль может осуществляться нутромером НИ 18–50–2 по ГОСТ 868-82 с погрешностью $\delta_{\text{СИ}} = 20$ мкм или микроскопом универсальным по ГОСТ 8074-82 с погрешностью $\delta_{\text{СИ}} = 10$ мкм. Как изменятся требования к контролю и средству измерений при достижении индекса $C_{pO} \approx 1,33$?

Реальная изменчивость (без погрешности)

$$\sigma_{\text{тех}} = \frac{IT}{6 \cdot C_{pA}} = \frac{0,25}{6 \cdot 1,0} = 0,042 \text{ мм.}$$

Среднее квадратическое отклонение погрешности измерения

$$\sigma_{\text{изм}} = \frac{\delta_{\text{изм}}}{3} = \frac{0,05}{3} = 0,017 \text{ мм.}$$

Наблюдаемая изменчивость процесса σ_O определяется как

$$\sigma_O = \sqrt{\sigma_{\text{тех}}^2 + \sigma_{\text{изм}}^2} = \sqrt{0,042^2 + 0,017^2} = 0,045 \text{ мм.}$$

Наблюдаемый индекс

$$C_{pO} = \frac{IT}{6 \cdot \sigma_O} = \frac{0,25}{6 \cdot 0,045} = 0,926 < 1,33.$$

Вероятное количество неправильно принятых деталей $m \approx 2,2\%$, неправильно забракованных $n \approx 2,9\%$ (суммарно около 5,1%) (табл. 3).

Таблица 3. Результаты моделирования параметров контроля при различных $\delta_{изм}/IT$ и C_p процесса

Table 3. Results of modeling inspection parameters for different δ_{meas}/IT ratios and process C_p values

Параметр	Значения		
	исходные (по [1])	в условиях стабильности	в условиях стабильности и пригодности (MSA)
$\delta_{изм}/IT$	0,020 или 20 %	0,094 или 9,4 %	0,043 или 4,3 %
Δ , мкм	50,0	23,5	11,0
$A_{мет(г)}$	6,7	3,1	1,5
$\sigma_{тех}$, мм	0,042	0,031	0,032
$IT/\sigma_{тех}$	6,0	8,0	7,8
C_p процесса	1,00	1,40	1,34
C_{p0}	0,93	1,35	1,33
Среднее m , %	2,23	0,67	0,28
Среднее n , %	2,92	0,93	0,54
Σ	5,15	1,60	0,82

Наименьшие ошибки контроля ($m = 0,67\%$, $n = 0,93\%$, $\Sigma = 1,60\%$) достигаются при целевом значении $C_p = 1,40$, наблюдаемый индекс при этом составит $C_{p0} = 1,35$. Отношение $\delta_{изм}/IT$ составит 9,4% (что соответствует погрешности измерений 23,5 мкм для допуска 250 мкм). Согласно (12), $\%GRR < 30\%$, что определяет измерительный процесс как условно пригодный.

Для достижения $\%GRR \leq 10\%$ необходимо выбирать СИ из отношения $\delta_{изм}/IT = 0,043$, суммарная ошибка контроля уменьшается в 2 раза по сравнению с результатами, полученными при индексе $C_p = 1,40$ (см. табл. 3). Таким образом, легко заметить, что контроль данного размера нутромером НИ 18–50–2 по ГОСТ 868-82 с погрешностью $\delta_{си} = 20$ мкм согласно [10] можно охарактеризовать как условно пригодный, а контроль микроскопами универсальными по ГОСТ 8074-82 – как пригодный в условиях стабильности производственного процесса, соответствующий требованиям [2, 3].

Повышение стабильности процесса (C_p растет) и выбор более грубых (или дешевых) СИ для контроля приводит к увеличению ошибок контроля. Однако на практике обычно стремятся уменьшать ошибки контроля. Поэтому оптимальным будет выбор такого C_p процесса и такой погрешности измерения, которые минимизируют суммарные потери от ошибок контроля.

Таким образом, на основе достигнутого уровня качества производства (индекса C_p) можно определять требуемую точность СИ и приоритеты действий (улучшать процесс или ужесточать контроль), а также выбирать СИ в условиях контроля с необходимыми параметрами ошибок I и II рода.

Заключение

Проведенное исследование позволило разработать целостный подход к формированию требований к точности СИ, интегрирующий принципы статистического управления процессами (SPC) и анализа измерительных систем (MSA). На основе требований ГОСТ 8.051-81 и MSA проведен комплексный анализ взаимосвязи воспроизводимости технологического процесса (C_{p0}), погрешности измерений ($\delta_{изм}/IT$, $\%GRR$) и вероятностей ошибочных решений (α , β).

Полученные результаты позволили подтвердить, что пороговые значения $\%GRR$ в 10 и 30%, связанные с нормируемыми отношениями $\delta_{изм}/IT$ по ГОСТ 8.051-81, соответствуют принципиально разным уровням контроля над процессом и сопряжены с различными количественно оцениваемыми рисками α (ложной браковки) и β (пропуска брака), величина которых критически зависит от реального индекса воспроизводимости процесса C_p .

На основе вычислительных экспериментов статистического моделирования были:

а) определены критические значения $\delta_{изм}/IT$, при которых погрешность СИ доминирует над технологическим разбросом, делая наблюдаемый C_p нерепрезентативным;

б) построены зоны соответствия требованиям MSA (C_p , $\delta_{изм}/IT$), позволяющие визуально оценить адекватность выбранного СИ для процесса заданной стабильности;

в) разработаны практические номограммы и алгоритмы, которые для заданного качества (IT), целевого уровня рисков (α , β) и известного C_p процесса позволяют выработать рекомендации о точности принимаемого СИ на основе $\delta_{изм}/IT$ и $\%GRR$.

Таким образом, представленный подход представляет инженерам, метрологам и руководителям производства научно обоснованный инструмент для принятия взвешенных решений, направленных на повышение качества продукции и эффективности контроля при оптимальном использовании ресурсов. Дальнейшим развитием работы может стать разработка специализированного программного обеспечения, реализующего предложенные алгоритмы и модели в удобном для пользователя интерфейсе.

Список источников

1. ГОСТ 8.051-81 ГСИ. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм. Введ. 1982.01.01. Минск: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2004. 12 с.
2. ГОСТ Р 51814.5-2005. Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Анализ измерительных и контрольных процессов. Введ. 2005.07.01. М.: Стандартинформ, 2005. 54 с.
3. Анализ измерительных систем. Ссылочное руководство. MSA: пер. с англ. Н. Новгород: ООО СМЦ «Приоритет», 2012. 422 с.

4. РМГ 29-2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. Введ. 2015.01.01. Взамен РМГ 29-99. М.: Стандартинформ, 2014. 69 с.
5. Гвоздев В.Д. Допустимая погрешность измерений: выбор значения // Законодательная и прикладная метрология. 2013. №2. С. 44-48.
6. Соломахо Д.В. Метрологическое моделирование процессов операционного контроля геометрических параметров деталей как инструмент обеспечения достоверности // Приборы и методы измерений. 2011. №1 (2). С. 117-121.
7. Чигрик Н.Н. Исследование влияния погрешности средства измерений на параметры разбраковки и точность технологического процесса при измерительном контроле высоты поршневых колец автомобильного двигателя // ОНВ. 2014. №2 (130). С. 86-92.
8. Леонов О.А., Антонова У.Ю. Выбор универсальных средств измерений для контроля гильз цилиндров двигателя при селективной сборке // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 6. С. 52-57.
9. ГОСТ Р ИСО 22514-4-2021. Статистические методы. Управление процессами. Часть 4. Оценка показателей воспроизводимости и пригодности процесса. Введ. 2022.01.01. Взамен ГОСТ Р 50779.46-2012/ ISO/TR 22514-4:2007. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 40 с.
10. РД 50-98-86. Методические указания. Выбор универсальных средств измерений линейных размеров до 500 мм (по применению ГОСТ 8.051-81). Введ. 1987.07.01. М.: Госстандарт СССР, 1987. 68 с.
2. GOST R 51814.5-2005. Quality management systems in the automotive industry. Analysis of measurement and control processes. Moscow: Standartinform, 2005, 54 p. (In Russ.)
3. Analysis of measuring systems. Reference guide. MSA: Translation from English. Nizhny Novgorod: SMC Prioritet LLC, 2012, 422 p. (In Russ.)
4. RMG 29-2013 GSI. Metrology. Basic terms and definitions. Replaced RMG 29-99. Moscow: Standartinform, 2014, 69 p. (In Russ.)
5. Gvozdev V.D. Permissible measurement error: choosing a value. *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya* [Legislative and applied metrology]. 2013;(2):44-48. (In Russ.)
6. Solomakho D.V. Metrological modeling of operational control processes of geometric parameters of parts as a tool for ensuring reliability. *Pribory i metody izmereniy* [Instruments and methods of measurement]. 2011;(1(2)):117-121. (In Russ.)
7. Chigrik N.N. Study of the influence of the error of the measuring instrument on the parameters of rejection and the accuracy of the technological process during measuring control of the height of piston rings of an automobile engine. *ONV* [Omsk Scientific Bulletin]. 2014;(2(130)):86-92. (In Russ.)
8. Leonov O.A., Antonova U.Yu. Selection of universal measuring instruments for monitoring engine cylinder liners during selective assembly. *Traktory i selkhoz mashiny* [Tractors and agricultural machinery]. 2017;(6):52-57. (In Russ.)
9. GOST R ISO 22514-4-2021. Statistical methods. Process control. Part 4. Evaluation of process capability and suitability. Replaced GOST R 50779.46-2012/ISO/TR 22514-4:2007. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2021, 40 p. (In Russ.)
10. RD 50-98-86 Guidelines. Selection of universal measuring instruments for linear dimensions up to 500 mm (using GOST 8.051-81). Moscow: USSR State Standard, 1987, 68 p. (In Russ.)

References

1. GOST 8.051-81 GSI. Errors permissible in measuring linear dimensions up to 500 mm. Minsk: Interstate Council for Standardization, Metrology, and Certification, 2004, 12 p. (In Russ.)
2. GOST R 51814.5-2005. Quality management systems in the automotive industry. Analysis of measurement and control processes. Moscow: Standartinform, 2005, 54 p. (In Russ.)
3. Analysis of measuring systems. Reference guide. MSA: Translation from English. Nizhny Novgorod: SMC Prioritet LLC, 2012, 422 p. (In Russ.)
4. RMG 29-2013 GSI. Metrology. Basic terms and definitions. Replaced RMG 29-99. Moscow: Standartinform, 2014, 69 p. (In Russ.)
5. Gvozdev V.D. Permissible measurement error: choosing a value. *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya* [Legislative and applied metrology]. 2013;(2):44-48. (In Russ.)
6. Solomakho D.V. Metrological modeling of operational control processes of geometric parameters of parts as a tool for ensuring reliability. *Pribory i metody izmereniy* [Instruments and methods of measurement]. 2011;(1(2)):117-121. (In Russ.)
7. Chigrik N.N. Study of the influence of the error of the measuring instrument on the parameters of rejection and the accuracy of the technological process during measuring control of the height of piston rings of an automobile engine. *ONV* [Omsk Scientific Bulletin]. 2014;(2(130)):86-92. (In Russ.)
8. Leonov O.A., Antonova U.Yu. Selection of universal measuring instruments for monitoring engine cylinder liners during selective assembly. *Traktory i selkhoz mashiny* [Tractors and agricultural machinery]. 2017;(6):52-57. (In Russ.)
9. GOST R ISO 22514-4-2021. Statistical methods. Process control. Part 4. Evaluation of process capability and suitability. Replaced GOST R 50779.46-2012/ISO/TR 22514-4:2007. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2021, 40 p. (In Russ.)
10. RD 50-98-86 Guidelines. Selection of universal measuring instruments for linear dimensions up to 500 mm (using GOST 8.051-81). Moscow: USSR State Standard, 1987, 68 p. (In Russ.)

Поступила 21.02.2026; принята к публикации 16.03.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 21/02/2026; revised 16/03/2026; published 30/09/2026

Сойко Алексей Игорьевич – кандидат технических наук, доцент,

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, Россия.

Email: alexsoiko@yandex.ru. ORCID 0000-0001-8331-351X

Савельева Дарья Алексеевна – студент,

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, Россия.

Email: savelevadasha2004@mail.ru.

Денисова Яна Владимировна – кандидат экономических наук, доцент,

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия.

Email: ana-denisova@inbox.ru. ORCID 0000-0003-1242-6909

Alexey I. Soyko – PhD (Eng.), Associate Professor,

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia.

Email: alexsoiko@yandex.ru. ORCID 0000-0001-8331-351X

Daria A. Savelyeva – Student,

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia.

Email: savelevadasha2004@mail.ru.

Yana V. Denisova – PhD (Eng.), Associate Professor,

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

Email: ana-denisova@inbox.ru. ORCID 0000-0003-1242-6909

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.51:004.94
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-143-149



АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ЗАМЕНЫ ДЕТАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПОТОКА ЕГО ЭКВИВАЛЕНТНОЙ МОДЕЛЮ

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). Для современного этапа развития производственных систем актуальна задача предсказания их поведения в изменяющихся условиях. Это возможно за счет создания имитационной модели производственной системы, включающей сеть производственных потоков. На этапе разработки модели необходимо определить уровень детальности описания структуры производственного потока, позволяющий достичь цели моделирования при сохранении точности модели. **Цель работы и методы исследования.** Поставлена задача определения возможности использования упрощенной модели процесса при моделировании производственных систем – сети производственных процессов (потоков). С этой целью были разработаны две отличные по структуре имитационные модели одного и того же производственного потока. Базовая (детальная) модель полностью повторяет структуру потока; эквивалентная модель по структуре более проста, но ее характеристики и поведение с определенной степенью точности соответствуют детальной модели. На основе серии испытаний этих имитационных моделей анализируется возможность замены детальной модели производственного потока его эквивалентной моделью. Испытания моделей проводятся в условиях отсутствия вариабельности в работе оборудования рабочих станций (наилучший случай) и в условиях ее наличия (практический случай). **Результаты.** Результаты испытаний для случаев наличия и отсутствия вариабельности в работе оборудования хорошо согласуются как между собой, так и с теоретическим поведением производственного потока. **Практическая значимость.** Эквивалентная имитационная модель производственного потока позволяет упростить модель сети производственных потоков, а значит, и сократить затраты на ее разработку и испытания. При этом сохраняется достаточная точность получаемых результатов (характеристик производственного потока), следовательно, применение эквивалентных моделей производственных потоков целесообразно при моделировании их поведения.

Ключевые слова: производственный поток, имитационная модель, характеристики производственного потока, производительность, время цикла, объем незавершенного производства

© Запорожцев А. В., Хазова Вер. И., Хазова Вик. И., 2026

Для цитирования

Запорожцев А. В., Хазова Вер. И., Хазова Вик. И. Анализ возможности замены детальной модели производственного потока его эквивалентной моделью // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 143-149. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-143-149>



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

ANALYSIS OF THE FEASIBILITY OF REPLACING A DETAILED PRODUCTION FLOW MODEL WITH ITS EQUIVALENT MODEL

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). At the current stage of development of production systems, predicting their behavior under changing conditions is an important task. This can be achieved by developing a simulation model of a production system incorporating a network of production flows. At the model development stage, it is necessary to determine the level of detail required to describe the structure of a production flow that makes it possible to achieve the modeling objective while maintaining model accuracy. **Objectives and Methods Applied.** The study addresses the feasibility of using a simplified process model for simulating production systems, specifically, a network of production processes (flows). For this purpose, two simulation models with different structures have been developed for the same production flow. The base (detailed) model fully reproduces the structure of the flow, whereas the equivalent model has a simpler structure, while its characteristics and behavior correspond to those of the detailed model with a certain degree of accuracy. Based on a series of tests of these simulation models, the feasibility of replacing the detailed production flow model with its equivalent model has been analyzed. The models have been tested under conditions of no variability in the operation of workstation equipment (the best-case scenario) and under conditions where such variability is present (the practical scenario). **Results.** The test results for both the cases with and without variability in equipment operation are in good agreement with each other and with the theoretical behavior of the production flow. **Practical Relevance.** An equivalent simulation model of a production flow makes it possible to simplify the model of a production-flow network and, consequently, reduce the costs associated with its development and testing. At the same time, sufficient accuracy of the obtained results (production flow characteristics) is maintained. Therefore, the use of equivalent models of production flows is considered appropriate for simulating their behavior.

Keywords: production flow, simulation model, production flow characteristics, throughput, cycle time, work-in-process

For citation

Zaporozhtsev A.V., Khazova Ver.I., Khazova Vik.I. Analysis of the Feasibility of Replacing a Detailed Production Flow Model with its Equivalent Model. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 143-149. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-143-149>

Введение

Имитационное моделирование играет значительную роль в изучении современных производственных систем [1]. Объясняется это тем, что производственные системы относятся к классу организационно-технических, отличаются комплексным поведением ввиду многообразия связей между своими элементами, поэтому их имитационные модели позволяют оценивать показатели производственной системы и облегчают процессы принятия решений. Однако создание имитационной модели сопряжено с определенными проблемами [2], в частности, на этапе разработки возникает проблема детальности описания структуры производственного потока. При детальном описании структуры производственного потока модель сети производственных потоков оказывается громоздкой, что затрудняет работу с такой моделью. В этой связи важным становится вопрос оценки возможности использования эквивалентной имитационной модели производственного потока. Будем понимать под ней такую модель, у которой основные характеристики и поведение с определенной степенью точности соответствует характеристикам и поведению детальной имитационной модели производственного потока. Основное назначение эквивалент-

ной модели – упростить имитационную модель производственного потока, что позволит моделировать поведение сложных производственных систем. Возможность построения эквивалентной модели производственного потока основана на теории подобия [3].

Метод исследования

Согласно W. Норр и M.L. Spearman [4], производственный поток – это поток объектов через последовательность рабочих станций. Параметрами производственного потока является число рабочих станций и их пропускная способность, то есть количество объектов, которые могут быть обработаны на каждой рабочей станции. К основным характеристикам производственного потока относятся производительность TH , время цикла CT и объем незавершенного производства WIP . Теоретические характеристики производственного потока рассмотрены в работе [4] на примере модели, показанной на рис. 1.

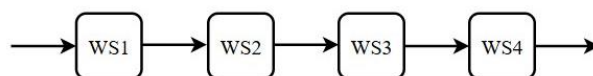


Рис. 1. Модель производственного потока

Fig. 1. A production flow model

Рассмотрены три случая работы производственного потока: наилучший, наихудший и практический. Наилучший случай соответствует сбалансированной линии, когда производительность всех рабочих станций одинакова, а действие случайных факторов отсутствует. Наихудший случай иллюстрирует обработку партий объектов либо вариант, при котором время обработки каждого из объектов является случайной величиной. Практический случай характеризуется случайной величиной пропускной способности оборудования. Практический случай является базой для проведения бенчмаркинга реальных производственных потоков и часто используется в работах по исследованию проблем производства [5].

Модель, показанная на **рис. 1**, является достаточно простой. Изучение реальных производственных систем ввиду сложности их поведения требует разработки имитационных моделей на основе принципов системной динамики [6, 7]. При разработке имитационной модели производственных потоков важным становится вопрос необходимого уровня детальности в описании структуры потока.

Введем понятия базовой (детальной) и эквивалентной имитационных моделей производственного потока. Базовая имитационная модель содержит все элементы моделируемого производственного потока. Эквивалентная имитационная модель содержит минимальный набор элементов, необходимый для моделирования производственного потока, и ее поведение и основные характеристики с определенной степенью точности соответствуют характеристикам и поведению базовой имитационной модели.

Для установления корректности использования при изучении производственных потоков их эквивалентных моделей необходимо сопоставить характеристики потока, полученные в результате испытаний базовой и эквивалентной моделей, между собой, а также с характеристиками, полученными на основе теоретических расчетов по методике [4]. Испытания целесообразно проводить для двух возможных случаев:

1. Отсутствие вариабельности в работе оборудования рабочих станций, то есть наилучший случай. Расчетные формулы для определения теоретических характеристик производственного потока [4] имеют вид

$$CT_{best} = \begin{cases} T_o, & \text{если } WIP \leq WIP_0 \\ \frac{WIP}{r_b}, & \text{если } WIP > WIP_0 \end{cases}, \quad (1)$$

$$TH_{best} = \begin{cases} \frac{WIP}{T_o}, & \text{если } WIP \leq WIP_0 \\ r_b, & \text{если } WIP > WIP_0 \end{cases}. \quad (2)$$

где CT_{best} , TH_{best} – время цикла и пропускная способность процесса для наилучшего случая; T_o – чистое операционное время; r_b – пропускная способ-

ность оборудования, являющегося ресурсом, лимитирующим производительность потока; WIP_0 – критический уровень НЗП.

2. Наличие вариабельности в работе оборудования рабочих станций, то есть практический случай. Расчетные формулы для определения теоретических характеристик производственного потока имеют вид [4]

$$CT_{PWC} = T_o + \frac{WIP - 1}{r_b}, \quad (3)$$

$$TH_{PWC} = \frac{WIP \cdot r_b}{WIP_0 + WIP - 1}. \quad (4)$$

где CT_{PWC} , TH_{PWC} – время цикла и пропускная способность процесса для практического случая.

Таким образом, теоретические характеристики производственного потока представляют собой функции параметров производственного потока – чистого операционного времени процесса T_o , пропускной способности лимитирующего ресурса r_b и независимой переменной объема незавершенного производства WIP . То есть результаты испытаний имитационных моделей производственного потока будут представлены в виде графиков изменения параметров моделей при определенном значении интенсивности входного потока объектов r_a . Для построения характеристик имитационных моделей необходимо провести серию испытаний при различных значениях интенсивности входного потока r_a . Интенсивность входного потока должна изменяться в диапазоне от 0 до r_b , так как при больших значениях интенсивности входного потока объем незавершенного производства WIP будет неограниченно возрастать.

Теоретическая модель производственного потока. Определим теоретические характеристики модели производственного потока, представленной на **рис. 1**. Модель включает четыре рабочих станции с одинаковыми параметрами, каждая рабочая станция выполняет работу за 2 ч (время обработки $t_e = 2$ ч) и сразу (без задержки) передает работу на следующую рабочую станцию. Так как время обработки на всех станциях одинаковое, то все станции имеют одинаковую пропускную способность

$$r = \frac{1}{t_e} = 0,5 \text{ ед/ч}.$$

Чистое операционное время производственного потока равно сумме времени обработки на всех рабочих станциях и для рассматриваемого примера составит $T_o = 8$ ч.

Критический уровень НЗП WIP_0 определяется пропускной способностью лимитирующего ресурса

r_b и чистым операционным временем T_o . Поскольку пропускная способность всех рабочих станций одинакова, то $r_b = r = 0,5$ и

$$WIP_0 = r_b T_o = 0,5 \cdot 8 = 4 \text{ шт.}$$

Базовая имитационная модель производственного потока. Эффективным инструментом моделирования производственных потоков является модель потоков и запасов [8, 9]. В модели потоков и запасов используются следующие элементы:

1. Поток моделирует перемещение совокупности объектов и характеризуется количеством объектов в единицу времени.

2. Резервуар моделирует место хранения объектов и характеризуется количеством объектов.

3. Конвейер моделирует обработку объектов на каком-либо оборудовании, характеризуется временем обработки объектов и количеством обрабатываемых объектов.

4. Коннектор – элемент, используемый для вычисления параметров модели.

Таким образом, при моделировании производственного потока, состоящего из четырех рабочих станций, для каждой производственной ячейки используется совокупность следующих элементов:

Резервуар S – Входной поток R – Конвейер M – Выходной поток T.

Вид базовой имитационной модели, выполненной в программе моделирования iThink, показан на рис. 2.

Базовая модель производственного потока включает следующие элементы:

- входной поток объектов r_a , поступающих на обработку (ед./ед. времени);
- запасы объектов перед рабочими станциями S1, S2, S3, S4 (ед.);
- рабочие станции (станки) M1, M2, M3, M4, характеризующиеся количеством обрабатываемых объектов (ед.);
- входные $r1, r2, r3, r4$ и выходные $t_{e1}, t_{e2}, t_{e3}, t_{e4}$ потоки объектов рабочих станций, которые характеризуются пропускной способностью (ед./ед. времени). Начальные значения $t_{e1} - t_{e4}$ содержат время обработки объектов;

– расчетные величины: объем незавершенного производства WIP, производительность потока TH и время цикла CT.

Математическая модель поведения производственного потока описывается системой дифференциальных уравнений, включающей по четыре ($i=1 \div 4$) разностных уравнения для запасов и станков:

$$\begin{aligned} S_{i,t} &= S_{i,t-dt} + (t_{ei-1} - r_i) dt, \\ M_{i,t} &= M_{i,t-dt} + (r_i - t_{ei}) dt. \end{aligned} \quad (5)$$

Приняты следующие начальные значения параметров модели:

$$S1 = S2 = S3 = S4 = 0; \quad M1 = M2 = M3 = M4 = 1;$$

$$r1 = r2 = r3 = r4 = 0,5; \quad t_{e1} = t_{e2} = t_{e3} = t_{e4} = 2.$$

В ходе вычислений определяются следующие переменные:

1. TH – производительность потока, определяется встроенной функцией программы iThink THROUGHPUT(T4).

2. CT – время цикла, определяется встроенной функцией программы iThink CYCLETIME(T4).

3. WIP – объем незавершенного производства, определяется суммарным количеством объектов, находящихся в процессе обработки на рабочих станциях, и объектов, находящихся внутри процесса в ожидании обработки.

$$WIP = \sum_{i=1}^4 S_i + \sum_{i=1}^4 M_i. \quad (6)$$

Эквивалентная имитационная модель производственного потока. В отличие от базовой модели производственного потока, содержащей четыре рабочие станции, эквивалентная модель этого потока содержит только один рабочий центр, характеристики которого определяются из условия соответствия параметрам базовой модели. Основными условиями являются:

- равенство чистого времени обработки T_o базовой и эквивалентной моделей;
- равенство пропускных способностей лимитирующих ресурсов r_b базовой и эквивалентной моделей.

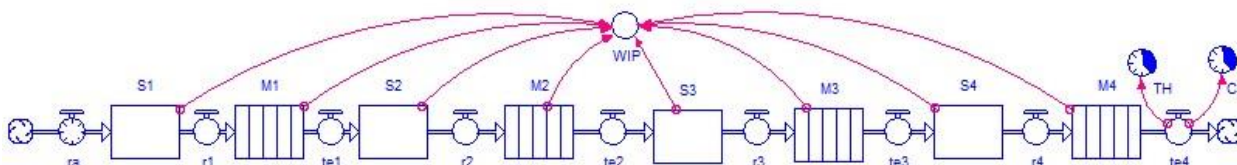


Рис. 2. Базовая модель производственного потока

Fig. 2. A basic model of a production flow

Эквивалентная модель производственного потока, разработанная в iThink, представлена на **рис. 3**. Эквивалентная модель содержит один резервуар и один конвейер, между которыми установлен поток r_b , определяющий пропускную способность лимитирующего ресурса. Время обработки объектов конвейером равно чистому операционному времени базового потока. Резервуар служит для временного хранения объектов перед обработкой на станке.

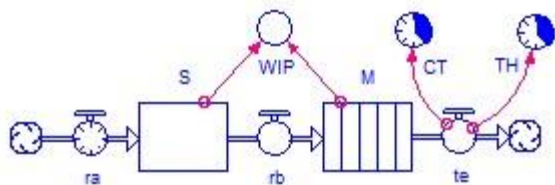


Рис. 3. Эквивалентная модель производственного потока

Fig. 3. An equivalent model of a production flow

Модель эквивалентного производственного потока (см. **рис. 3**) имеет следующие объекты:

- входной поток объектов r_a , поступающих на обработку (ед./ед. времени);
- запас объектов перед рабочей станцией S (ед.);
- рабочая станция (станок) M , характеризующаяся количеством обрабатываемых объектов (ед.);
- входной r_b и выходной t_e потоки объектов рабочих станций, характеризующиеся пропускной способностью (ед./ед. времени) и временем обработки;
- расчетные величины: объем незавершенного производства WIP , производительность потока TH и время цикла CT .

Математическая модель поведения производственного потока описывается системой дифференциальных уравнений, включающей одно разностное уравнение для запаса и одно разностное уравнение для станка:

$$\begin{aligned} S_t &= S_{t-dt} + (r_a - r_b)dt; \\ M_t &= M_{t-dt} + (r_b - t_e)dt. \end{aligned} \quad (7)$$

Приняты следующие начальные значения параметров модели:

$$S = 0; M = 4; r_b = 0,5; t_e = 8,$$

где t_e – суммарное время обработки на четырех рабочих станциях базовой модели производственного потока.

В ходе вычислений определяются следующие переменные:

1. TH – производительность потока, определяется встроенной функцией программы iThink – THROUGHPUT(T).

2. CT – время цикла, определяется встроенной функцией программы iThink – CYCLETIME(T).

3. WIP – объем незавершенного производства, вычисляется по формуле $WIP = S + M$.

Полученные результаты и их обсуждение

1. Случай отсутствия вариабельности в работе оборудования рабочих станций (наилучший случай).

Результаты испытаний базовой и эквивалентной имитационных моделей производственного потока в сравнении с теоретическими данными для наилучшего случая представлены в **табл. 1**.

Таблица 1. Данные испытаний базовой и эквивалентной моделей для наилучшего случая
Table 1. Test data of the basic and equivalent models for the best-case scenario

Ra	Теоретическая модель			Базовая модель			Эквивалентная модель		
	TH	CT	WIP	TH	CT	WIP	TH	CT	WIP
0,125	0,125	8	1	0,125	8	1	0,125	8	1
0,250	0,250	8	2	0,250	8	2	0,250	8	2
0,375	0,375	8	3	0,375	8	3	0,375	8	3
0,50	0,50	8	4	0,50	8	4	0,50	8	4

Как видно из приведенных данных, поведение эквивалентной имитационной модели производственного потока совпадает с теоретическими характеристиками и поведением базовой имитационной модели производственного потока.

2. Наличие вариабельности в работе оборудования рабочих станций (практический случай).

При моделировании вариабельности оборудования принято использовать экспоненциальное распределение [4, 10] времени обработки объектов. В имитационной модели производственного потока работа оборудования определяется его пропускной способностью r . Учитывая, что пропускная способность

$$r = \frac{1}{t_e}, \quad (8)$$

где t_e – время обработки объекта на станке, можно записать выражение для функции экспоненциального распределения случайной величины пропускной способности:

$$r = \frac{1}{t_e} \cdot [-\ln(c)], \quad (9)$$

где c – случайное число в диапазоне от 0 до 1.

Для базовой и эквивалентной моделей пропускная способность оборудования одинакова и составляет 0,5ед./ч, что соответствует времени обработки на отдельном станке в течение 2 ч. Тогда пропускная способность производственного потока будет равна

$$r = \frac{1}{2} \cdot [-\ln(c)]. \quad (10)$$

Основной проблемой испытаний имитационных моделей в условиях вариабельности является то, что при изменении интенсивности входного потока r_a от 0 до 1 значение объема незавершенного производства будет стремиться к WIP_0 или постоянно возрастать. Из этого следует, что при определенном значении r_a значение WIP будет относительно стабильным. Стабильность объема незавершенного производства при испытании имитационных моделей свидетельствует о том, что этот режим работы соответствует одной из точек на теоретической характеристике (формулы (3) и (4)) модели производства для практического случая.

Дополнительной проблемой при испытаниях имитационной модели производственного потока в условиях вариабельности пропускной способности оборудования является случайность поведения параметров модели – каждая новая реализация отличается от всех остальных. Случайный характер поведения характеристик модели требует статистических методов обработки результатов. При проведении испытаний имитационных моделей в условиях вариабельности использован метод обработки данных [10], суть которого заключается в осреднении нескольких реализаций (сценариев) работы имитационной модели. Осреднение характеристики WIP проводилось по десяти реализациям испытаний имитационных моделей.

Усредненная характеристика WIP остается случайной и поэтому необходимо определить среднее значение характеристики WIP как среднее по времени. Таким образом, итоговый результат поведения имитационной модели усредняется по сценариям и по времени.

В результате испытаний базовой и эквивалентной имитационных моделей получены следующие характеристики (табл. 2).

Таблица 2. Данные испытаний базовой и эквивалентной моделей для практического случая
Table 2. Test data of the basic and equivalent models for the practical scenario

Характеристика	Базовая модель	Эквивалентная модель
WIP	26,09	25,3
TH	0,38	0,42
CT	58,0	56,92

На рис. 4 и 5 представлены теоретические характеристики TH и CT модели производственного потока для практического случая [4] и результаты испытаний базовой и эквивалентной имитационных моделей.

Таким образом, обе имитационные модели дают результаты, которые согласуются друг с другом и достаточно хорошо согласуются с характеристиками теоретической модели для практического случая.

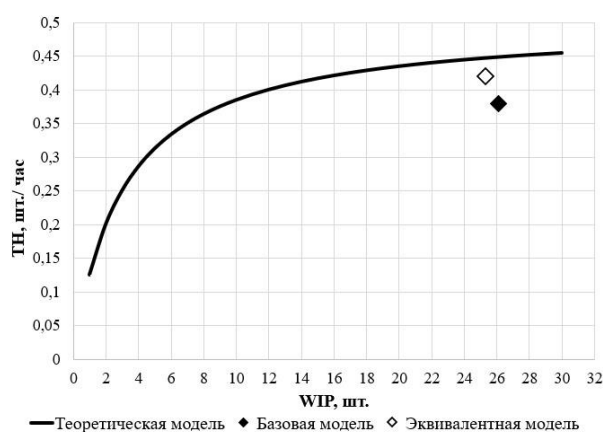


Рис. 4. Производительность производственного потока

Fig. 4. Production flow throughput

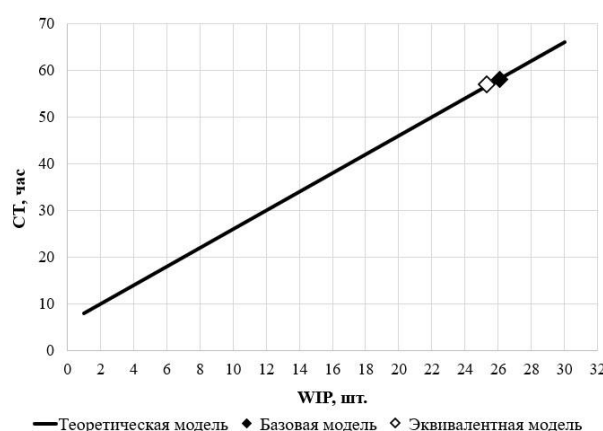


Рис. 5. Время цикла производственного потока

Fig. 5. Production flow cycle time

Заключение

1. Подтверждено, что при отсутствии вариабельности работы рабочих станций характеристики базовой и эквивалентной имитационных моделей точно соответствуют теоретическим характеристикам модели производственного потока.

2. При наличии вариабельности работы рабочих станций характеристики базовой и эквивалентной имитационных моделей достаточно хорошо согласуются с теоретическими характеристиками модели производственного потока.

3. Показано, что ввиду достаточной точности получаемых результатов эквивалентная модель производственного потока может быть использована в задачах моделирования производственных систем.

Список источников

1. Mourtzis D. Simulation in the design and operation of manufacturing systems: state of the art and new trends // International Journal of Production Research. 2020, vol. 58, no. 7, pp. 1927-1949. DOI: 10.1080/00207543.2019.1636321.

2. Fowler J.W., Rose O. Grand Challenges in Modeling and Simulation of Complex Manufacturing Systems // SIMULATION: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International. 2004, vol. 80, no. 9, pp. 469-476. doi:10.1177/0037549704044324.
3. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М.: ЛКИ, 2018. 296 с.
4. Hopp W.J., Spearman M.L. Factory Physics: foundations of Manufacturing Management. Long Grove: Waveland Press, 2011. 720 p.
5. 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.
6. Forrester J.W. Industrial dynamics. Eastford: Martino Fine Books, 2013. 480 p.
7. Sterman J.D. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. Boston: Irwin/McGraw-Hill, 2000. 1008 p.
8. Richmond Barry. An Introduction to System Thinking with STELLA. ISEE Systems, inc., 2004. 165 p.
9. Медоуз Д. Системное мышление. Как создавать и улучшать системы в бизнесе и жизни. М.: МИФ, 2025. 272 с.
10. Law A.M. Simulation Modeling and Analysis. New York: McGraw Hill, 2024. 688 p.
1. Mourtzis D. Simulation in the design and operation of manufacturing systems: state of the art and new trends. In: International Journal of Production Research. 2020;58 (7):1927-1949. DOI: 10.1080/00207543.2019.1636321.
2. Fowler, J.W., Rose O. Grand Challenges in Modeling and Simulation of Complex Manufacturing Systems. SIMULATION: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International. 2004;80(9):469-476. doi:10.1177/0037549704044324.
3. Gukhman A.A. *Vvedenie v teoriyu podobiya* [Introduction to similarity theory]. Moscow: LKI, 2018, 296 p. (In Russ.)
4. Hopp W.J., Spearman M.L. Factory Physics: foundations of Manufacturing Management. Long Grove: Waveland Press, 2011, 720 p.
5. 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.
6. Forrester J.W. Industrial dynamics. Eastford: Martino Fine Books, 2013, 480 p.
7. Sterman, J.D. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. Boston: Irwin/McGraw-Hill, 2000, 1008 p.
8. Richmond Barry. An Introduction to System Thinking with STELLA. ISEE Systems, inc., 2004, 165 p.
9. Medouz D. *Sistemnoe myshlenie. Kak sozdavat i uluchshat systemy v biznese i zhizni* [Systems thinking. How to create and improve systems in business and life]. Moscow: MIF, 2025, 272 p. (In Russ.)
10. Law A.M. Simulation Modeling and Analysis. New York: McGraw Hill, 2024, 688 p.

References

Поступила 19.02.2026; принята к публикации 25.03.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 19/02/2026; revised 25/03/2026; published 30/09/2026

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.
E-mail: 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.
E-mail: viverha@gmail.com. ORCID 0009-0000-6069-9966

Viktoriya I. Khazova – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
E-mail: diplomla@mail.ru. ORCID 0009-0003-2338-1635

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.79, 004.942
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-150-155



ОЦЕНКА ПЛОЩАДИ МАТЕРИАЛА, РАСПЛАВЛЕННОГО ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОДИНОЧНОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА В ПРОДОЛЬНОМ СЕЧЕНИИ ТРЕЩИНЫ

Глчян Н.Ш., Лосев А.С.

Хабаровское отделение Института прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук,
Хабаровск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Аддитивные технологии широко используются в различных отраслях и являются неотъемлемой частью современной промышленности. Благодаря математическому моделированию процессов теплопереноса и фазовых превращений выступают важнейшим инструментом для изучения и описания особенностей различных режимов лазерного воздействия на материал. Использование аддитивных технологий позволяет достигать высокой точности и эффективности при обработке материала в условиях высоких температур. Но в большинстве случаев результаты математического моделирования основаны на рассмотрении гладких и геометрически правильных образцов, что не всегда выдерживается на практике. Поэтому возникает необходимость в исследовании особенностей физико-химических процессов, проходящих внутри ванны расплава на образцах, содержащих трещины или неровности. **Цель работы.** Расширить представление об особенностях физико-химических процессов, проходящих внутри ванны расплава на пористых образцах и установить аналитическую зависимость между площадью расплавленного материала в продольном сечении трещины и размерами трещины (шириной и глубиной). **Используемые методы.** Методы математической статистики, математического моделирования в программном комплексе COMSOL Multiphysic, численные методы. **Новизна.** Построена аналитическая зависимость между площадью материала, расплавленного под действием одиночного лазерного импульса в продольном сечении трещины, и геометрическими характеристиками трещины. **Результат.** На основе результатов численного моделирования построено множественное уравнение линейной регрессии, которое отражает аналитическую зависимость между площадью расплавленного материала в продольном сечении трещины при воздействии одиночного лазерного импульса и геометрическими характеристиками трещины. Для найденного уравнения аппроксимации получена оценка качества и приведено статистическое обоснование с уровнем значимости 95%. **Практическая значимость.** Результаты работы могут быть использованы в качестве основы для модернизации процесса зачеканки трещин их инъецирования и процесса уменьшения глубины пористости без добавления сторонних материалов.

Ключевые слова: математическое моделирование, селективное лазерное сплавление, лазерный импульс, тепловое поле, площадь проплавления, теплоперенос

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПМ ДВО РАН № 075-00460-26-00.

© Глчян Н.Ш., Лосев А.С., 2026

Для цитирования

Глчян Н.Ш., Лосев А.С. Оценка площади материала, расплавленного под действием одиночного лазерного импульса в продольном сечении трещины // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 150-155. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-150-155>



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

ESTIMATION OF THE AREA OF MATERIAL MELTED UNDER THE ACTION OF A SINGLE LASER PULSE IN THE LONGITUDINAL SECTION OF A CRACK

Glchyan N.Sh., Losev A.S.

Khabarovsk Branch of the Institute of Applied Mathematics, Far Eastern Branch, the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Additive technologies are widely used in various industries and have become an integral part of modern manufacturing. Mathematical modeling of heat transfer and phase transformation processes is an important tool for studying and describing the effects of different laser processing regimes on materials. The use of additive technologies makes it possible to achieve high accuracy and efficiency in material processing under high-temperature conditions. However, in most cases, mathematical modeling results are based on smooth and geometrically regular specimens, which does not always reflect actual processing conditions. Therefore, it is necessary to investigate the features of physicochemical processes occurring within a melt pool in specimens containing cracks or irregularities. **Objectives.** The aim of this study is to expand the understanding of the physicochemical processes occurring within a melt pool in porous specimens and to establish an analytical relationship between the area of material melted in the longitudinal section of a crack and the crack dimensions (width and depth). **Methods Applied.** The study employs methods of mathematical statistics, mathematical modeling using the COMSOL Multiphysics software package, and numerical methods. **Originality.** An analytical relationship between the area of material melted under the action of a single laser pulse in the longitudinal section of a crack and the geometric characteristics of the crack has been established. **Results.** Based on the results of numerical modeling, a multiple linear regression equation has been developed describing the analytical relationship between the area of melted material in the longitudinal section of a crack under the action of a single laser pulse and the geometric characteristics of the crack. The quality of the obtained approximation equation has been evaluated, and its statistical validity has been substantiated at a significance level of 95%. **Practical Relevance.** The results of the study can be used as a basis for improving crack sealing and crack injection processes, as well as for reducing porosity depth without the addition of external materials.

Keywords: mathematical modeling, selective laser melting, laser pulse, thermal field, melt pool area, heat transfer.

The study was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Applied Mathematics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IAM FEB RAS), No. 075-00460-26-00.

For citation

Glchyan N.Sh., Losev A.S. Estimation of the Area of Material Melted Under the Action of a Single Laser Pulse in the Longitudinal Section of a Crack. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 150-155. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-150-155>

Постановка задачи работы

Использование аддитивных технологий на различных этапах производства является неотъемлемой частью современной промышленности. Их применяют для изготовления изделий сложной геометрии посредством послойного наплавления, прямого и селективного лазерного спекания и конечного плавления. Особенностью данных процессов является высокая температура обработки материала, которая является причиной сложных процессов теплопереноса и фазовых переходов, проходящих в области ванны расплава. Подбор правильных технических параметров лазерной установки и учет физико-химических свойств материала обработки позволяет добиваться изделий высокого качества [1, 2]. В большинстве случаев проведение экспериментальных исследований, направленных на поиск таких данных, требует как

высоких экономических затрат, так и сложных технических реализаций [3, 4]. Именно поэтому математическое моделирование процессов теплопереноса и фазовых превращений выступает важнейшим инструментом изучения и описания особенностей различных режимов лазерного воздействия на материал.

Существенное количество научных работ посвящено математическому моделированию лазерного сплавления, учитывающему теплопроводность, гидродинамику расплава, испарение и формирование свободной поверхности [5–7]. Для обработки тугоплавких керамик, например оксида алюминия, созданы модели, включающие зависимость их свойств от температуры, учет скрытой теплоты фазовых переходов, а также граничные условия конвективного и радиационного охлаждения [8, 9].

В большинстве случаев аналитический результат таких работ, основанный на математическом модели-

ровании, представляет собой набор конкретных числовых характеристик, которые характеризуют особенности лазерного спекания или плавления в определенном режиме и конкретных условиях. В условиях оперативного инженерного анализа отдельный интерес представляют аналитические соотношения, отражающие связь основных параметров. Они позволяют заранее понимать возможности лазерной установки и оценивать потенциальный результат.

В настоящей работе на основе данных, полученных в ходе численного моделирования нестационарного температурного поля в среде COMSOL Multiphysics, строится аналитическая зависимость между площадью расплавленного под действием одиночного лазерного импульса материала в продольном сечении трещины и геометрическими характеристиками трещины, с последующей статистической обработкой результатов и оценкой их достоверности.

Постановка задачи

Рассмотрим математическую модель теплового поля $T(x, y, t)$, в основу которой положим нестационарное уравнение теплопроводности с объемным источником тепла от лазера:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

где ρ – плотность алюминия, кг/м³; C_p – его удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); k – теплопроводность, Вт/(м·К).

Удельная теплоемкость при постоянном давлении

$$C_p = C_{p,0} + \delta_m L_m + \left(\frac{L_m}{T_m} \right) H((T - T_m), \Delta T) + \delta_v L_v + \left(\frac{L_v}{T_v} \right) H((T - T_v), \Delta T) \quad (2)$$

зависит от теплоемкости $C_{p,0} = 880$, функций нормализации температуры плавления δ_m и нормализации температуры испарения δ_v :

$$\delta_m = \frac{\exp \left[-\frac{(T - T_m)^2}{nT^2} \right]}{nT\sqrt{\pi}}, \quad \delta_v = \frac{\exp \left[-\frac{(T - T_v)^2}{\Delta T^2} \right]}{\Delta T\sqrt{\pi}}, \quad (3)$$

скрытой теплоты плавления $L_m = 1067,43$ Дж / г, скрытой теплоты испарения $L_v = 1066,5$ Дж / г, температуры плавления $T_m = 2324$ К, температуры испарения $T_v = 3273,15$ К, полуширины кривой $\Delta T = 30$ К и функции Хевисайда H [9, 10].

Температурозависимые коэффициенты ρ , C_p , k определяются кусочно-аналитическими функциями [9].

На рис. 1 представлена геометрия модели. Стрелками сверху (граница 1) обозначена область воздействия лазера, плотность теплового потока которого характеризуется гауссовым распределением, Вт/м²:

$$P_g = B \left(\frac{E_p}{P_w \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right)} \right) \exp \left(-\frac{(x - x_r)^2}{2\Phi^2} \right), \quad (4)$$

где $\Phi = 100$ мкм – стандартное отклонение гауссова лазерного луча; $x_r = 1000$ мкм – опорная точка, соответствующая центру лазерного луча; $D = 0,6$ мм – диаметр луча; $B = 0,25$ – поглощательная способность; $P_w = 0,5$ мс – длительность импульса; E_p – энергия импульса.

Также на границе 1 наблюдаются естественное конвекционное охлаждение и излучение (пульсирующий лазерный источник тепла), которые задаются равенством

$$-k \frac{dT}{dy} = \beta P_g - h(T - T_a) - \sigma \varepsilon (T^4 - T_a^4), \quad (5)$$

где β – прямоугольная функция параметра включения и выключения лазера; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана; $\varepsilon = 0,7$ – излучательная способность; $T_a = 293,15$ К – температура окружающей среды; $h = 10$ Вт/(м²·К) – коэффициент теплоотдачи.

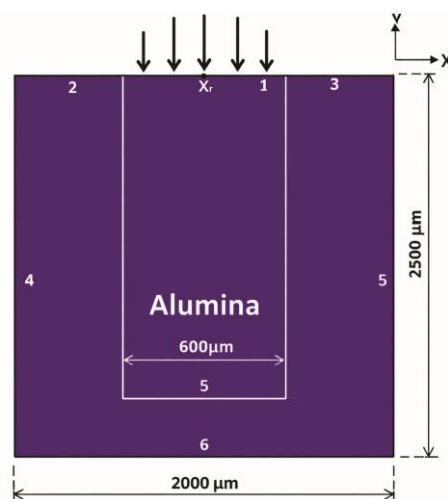


Рис. 1. Двумерная геометрия модели (1 μm = 10⁻⁶ м)
Fig. 1. Two-dimensional geometry of the model (1 μm = 10⁻⁶ м)

На границах 2 и 3 накладываются условия конвективного теплообмена, на границах 4 и 5 радиационные потери, на границе 6 краевое условие:

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_a) - \sigma \varepsilon (T^4 - T_a^4), \quad (6)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = h(T - T_a) - \sigma \varepsilon (T^4 - T_a^4), \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0. \quad (8)$$

В начальный момент времени во всей расчетной области температура равна температуре окружающей среды $T(x, y, 0) = T_0 = 293,15 \text{ K}$.

Методология исследования

Методами математического моделирования в программном комплексе COMSOL Multiphysics [11] с заданными параметрами лазера JK 701 Lumonics и керамического образца из оксида алюминия [9] проведена серия замеров площади расплавленного материала в продольном сечении образца по центральной оси запуска лазерного импульса при наличии в об-

разце трещин различной глубины, представленных в виде треугольников (рис. 2). Цель исследования – определение вида аналитической зависимости между площадью расплава и геометрическими характеристиками трещины.

Анализ и обсуждение результатов

С помощью имитационного моделирования в COMSOL Multiphysics для энергии импульса лазерной установки $E_p = 1 \text{ Дж}$ рассмотрена серия замеров площади расплавленного материала $S, \text{ м}^2$, в продольном сечении образца по центральной оси действия лазерного импульса при $T > 2324 \text{ K}$ в случае, когда в образце присутствует трещина, представленная в виде треугольника с высотой $h, \text{ м}$, и основанием $a, \text{ м}$. Смоделировано и обработано 33 различных примера с диапазоном для h от 10^{-4} м до $8 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ и для a от 10^{-4} м до $12 \cdot 10^{-4} \text{ м}$. Установлена функциональная зависимость вида

$$S(h, a) = 105 \cdot h \cdot 10^{-6} - 17 \cdot a \cdot 10^{-6} + 1,3 \cdot 10^{-8}. \quad (9)$$

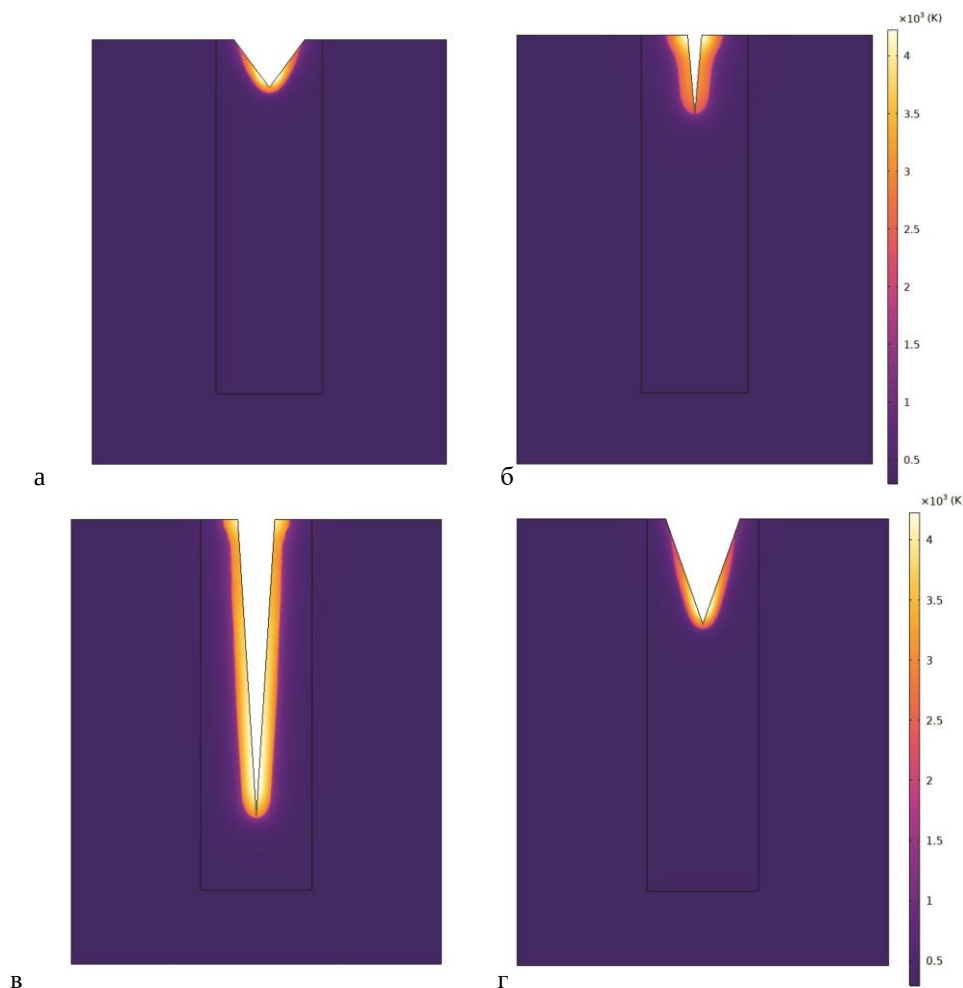


Рис. 2. Примеры трещин в ванне расплава: а – $h = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, $a = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}$; б – $h = 4,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, $a = 10^{-4} \text{ м}$; в – $h = 16 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, $a = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$; г – $h = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, $a = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}$

Fig. 2. Examples of cracks in the melt pool а is $h = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, $a = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}$; б is $h = 4,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, $a = 10^{-4} \text{ м}$; в is $h = 16 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, $a = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$; г is $h = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, $a = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}$

Необходимо отметить, что в случае $S(0,0) = 1,3 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$, полученное значение соответствует площади сечения ванны расплава в случае ровной поверхности образца (см. **рис. 1**), что численно подтверждается соответствующими результатами моделирования.

Методами математической статистики проведена проверка качества уравнения (9), а именно, оценка множественного коэффициент корреляции R

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sigma_{\text{ост}}^2}{\sigma_s^2}}, \quad (11)$$

где $\sigma_{\text{ост}}^2$ – остаточная дисперсия; σ_s^2 – общая дисперсия результативного признака S .

Она составляет 98%, что свидетельствует о высоком влиянии выбранных факторов на результат и высокой доле дисперсии результативного признака. Также аналогичная оценка статистической зависимости между h и a практически равна нулю, что является важным моментом при подборе факторов множественной регрессии.

Статистическая значимость с уровнем 95% подтверждается F -критерием Фишера:

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{n - m - 1}{m}, \quad (12)$$

где n – число наблюдений; m – число факторных признаков в линейной регрессии.

Установлено, что $F > F_{\text{таб}}$ как для всего уравнения (9), так и для каждого отдельного его коэффициента, что статистически обосновывает и подтверждает целесообразность включения выбранных факторов в уравнение и также подтверждает t -критерий Стьюдента при аналогичном уровне значимости.

Получены оценки средней квадратичной ошибки коэффициента регрессии m_h, m_a для h и a :

$$m_h = \frac{\sigma_s \sqrt{1 - R^2}}{\sigma_h \sqrt{1 - R_{ha}^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{n - m - 1}} = 9,02 \cdot 10^{-6},$$

$$m_a = \frac{\sigma_s \sqrt{1 - R^2}}{\sigma_a \sqrt{1 - R_{ha}^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{n - m - 1}} = 4,47 \cdot 10^{-6}, \quad (13)$$

где R_{ha}^2 – коэффициент корреляции между h и a ; $\sigma_s, \sigma_h, \sigma_a$ – средние квадратичные отклонения для признаков S, h и a соответственно.

Отметим, что, зная диаметр лазерного луча (в нашем случае $D = 0,6 \text{ мм}$), полученный результат можно использовать для оценки объема материала, расплавленного в трещине. Расчет в этом случае сводится к вычислению соответствующего интеграла по известной границе тела вращения. Предварительные

замеры показали, что чем уже и глубже трещина, тем больше объем расплавленного материала на стенках трещины, а в отдельных случаях он соизмерим и превышает объем самой трещины. Данный факт вызывает особый интерес с позиции организации технологического процесса по заделке трещин в образце без использования сторонних материалов, а именно уменьшение глубины трещины за счет её расширения.

Заключение

Разработанная модель позволяет оценить объем расплавленного материала на стенках трещины керамического образца из оксида алюминия. Полученная аппроксимация отражает аналитическую зависимость между площадью расплавленного материала в продольном сечении трещины её шириной и глубиной, что позволяет расширить представления об особенностях физико-химических процессов, проходящих внутри ванны расплава на пористых образцах. Полученный результат может быть использован в качестве основы для модернизации процесса зачеканки трещин и инъектирования, а также процесса уменьшения глубины пористости без добавления сторонних материалов.

Список источников

1. Аддитивные технологии. Материалы и технологические процессы / Рудской В.К. [и др.]. СПб.: Политех-Пресс, 2021. 515 с.
2. Mukherjee T., DebRoy T. Theory and Practice of Additive Manufacturing 1st Edition, Wiley, 2023.
3. Review on laser directed energy deposited aluminum alloys / Liu T.S., Chen P., et al. // Int. J. Extrem. Manuf. 2024, vol. 6, no. 2, 022004.
4. A review of multi-scale and multi-physics simulations of metal additive manufacturing processes with focus on modelling strategies / Bayat M., Dong W., Thorborg J., To A. C., Hattel J. H. // Additive Manufacturing, 2021, 47, 102278.
5. Yu T., Zhao J. Quantitative simulation of selective laser melting of metals enabled by new high-fidelity multiphase, multiphysics computational tool // Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 2022, 399, 115422.
6. Russell M.A., Souto-Iglesias A., Zohdi T.I. Numerical simulation of Laser Fusion Additive Manufacturing processes using the SPH method // Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 2018, 341, 163-187.
7. Yua J., Lin X., Wang J. Mechanics and energy analysis on molten pool spreading during laser solid forming // Applied Surface Science, 2010, 256, 4612-4620.
8. Samant A.N., Dahotre N.B. Laser machining of structural ceramics – a review // J. Eur. Ceram. Soc. 2009, vol. 29, no. 6, pp. 969-993.
9. One-dimensional multipulse laser machining of structural alumina: Evolution of surface topography / Vora H.D., Santhanakrishnan S., Harimkar S.P., Boetcher S.K.S., Dahotre N.B. // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2013, 68, 69–83.
10. Гордеев Г.А. Моделирование теплофизических процессов в порошках металлов при селективном лазер-

ном плавлении: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Ижевск, 2020. 189 с.

11. COMSOL Documentation [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://localhost:8090/docserver/#!/com.comsol.help.comsol/helpdesk/helpdesk.html>. Заглавие с экрана.

References

1. Rudskoy V.K. et al. *Additivnye tekhnologii. Materialy i tekhnologicheskie protsessy* [Additive technologies: Materials and technological processes]. Saint Petersburg: Politekh-Press, 2021, 515 p. (In Russ.)
2. Mukherjee T., DebRoy T. Theory and Practice of Additive Manufacturing. 1st ed. Wiley, 2023.
3. Liu T.S., Chen P. et al. Review on laser directed energy deposited aluminum alloys. *International Journal of Extreme Manufacturing*. 2024;6(2):022004.
4. Bayat M., Dong W., Thorborg J., To A.C., Hattel J.H. A review of multi-scale and multi-physics simulations of metal additive manufacturing processes with focus on modelling strategies. *Additive Manufacturing*. 2021;47:102278.
5. Yu T., Zhao J. Quantitative simulation of selective laser melting of metals enabled by new high-fidelity multiphase, multiphysics computational tool. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2022;399:115422.
6. Russell M.A., Souto-Iglesias A., Zohdi T.I. Numerical simulation of laser fusion additive manufacturing processes using the SPH method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2018;341:163-187.
7. Yua J., Lin X., Wang J. Mechanics and energy analysis on molten pool spreading during laser solid forming. *Applied Surface Science*. 2010;256:4612-4620.
8. Samant A.N., Dahotre N.B. Laser machining of structural ceramics - A review. *Journal of the European Ceramic Society*. 2009;29(6):969-993.
9. Vora H.D., Santhanakrishnan S., Harimkar S.P., Boetcher S.K.S., Dahotre N.B. One-dimensional multipulse laser machining of structural alumina: Evolution of surface topography. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;68:69-83.
10. Gordeev G.A. *Modelirovanie teplofizicheskikh protsessov v poroshkakh metallov pri selektivnom lazernom plavlenii* [Modeling of thermophysical processes in metal powders during selective laser melting]. Ph.D. dissertation in Physics and Mathematics. Izhevsk, 2020, 189 p. (In Russ.)
11. COMSOL Documentation. Available at: <http://localhost:8090/docserver/#!/com.comsol.help.comsol/helpdesk/helpdesk.html>.

Поступила 24.02.2026; принята к публикации 04.09.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 24/02/2026; revised 04/09/2026; published 30/09/2026

Лосев Александр Сергеевич – кандидат физико-математических наук, доцент, руководитель, Хабаровское отделение Института прикладной математики ДВО РАН, Хабаровск, Россия.
Email: A.S.Losev@yandex.ru. ORCID 0000-0002-5888-3737

Глчан Нюра Ширазовна – инженер-исследователь, Хабаровское отделение Института прикладной математики ДВО РАН, Хабаровск, Россия.
Email: glchyan@yandex.ru

Alexander S. Losev – PhD (Eng.), Associate Professor, Supervisor, Khabarovsk Branch of Institute for Applied Mathematics of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia.
Email: A.S.Losev@yandex.ru. ORCID 0000-0002-5888-3737.

Nyura Sh. Glchyan – Research Engineer, Khabarovsk Branch of Institute for Applied Mathematics of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia.
Email: glchyan@yandex.ru

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.791.76:620.179
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-156-163



РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА ДИАГНОСТИКИ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ И АДДИТИВНОГО ЭЛЕКТРОДУГОВОГО ВЫРАЩИВАНИЯ

Аносов М.С., Шатагин Д.А., Баевский А.А., Подувальцев А.А., Архипов М.В., Ямгулин Р.И.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Актуальность работы. Статья посвящена актуальной проблеме обеспечения стабильности и качества процесса аддитивного электродугового выращивания (WAAM), сдерживающей его широкое внедрение в ответственное производство. Традиционные методы неразрушающего контроля, применяемые постфактум, не позволяют оперативно корректировать процесс. **Цель работы.** Разработка комплексного диагностического подхода на основе in-situ-мониторинга для предиктивного контроля. Для этого предложен метод синхронной многопараметрической регистрации ключевых физических полей: электрических характеристик дуги (напряжение, ток) и сигналов акустической эмиссии (АЭ). В ходе экспериментальных исследований проводилась наплавка образцов-стенок с одновременной фиксацией данных. Анализ включал построение спектрограмм, фазовых портретов (энергоакустических аттракторов) и оценку их фрактальной размерности для выявления признаков устойчивости и дефектообразования. **Новизна.** Заключается в интеграции многопараметрических данных и применении глубоких нейросетевых моделей для их анализа в реальном времени. Проведен сравнительный анализ различных архитектур, включая сверточные и рекуррентные сети, для классификации режимов процесса по сырым и обработанным сигналам. Наилучший результат (точность 91%) показала двунаправленная рекуррентная модель (BiLSTM), использующая предварительно рассчитанные нелинейные параметры сигнала (фрактальную размерность и спектральную энтропию) в качестве ключевых признаков. Это позволяет модели эффективно выявлять тонкие паттерны, предшествующие срыву устойчивости. **Практическая значимость.** Состоит в создании основы для интеллектуальной системы предиктивного контроля, способной прогнозировать потерю устойчивости процесса за десятые доли секунды. Это открывает путь к системам адаптивного управления с замкнутым контуром, что критически важно для промышленного внедрения WAAM, обеспечивая не только контроль качества, но и оптимизацию режимов «на лету». Дальнейшее развитие предполагает интеграцию обученной модели в систему управления технологическим процессом и валидацию метода на более широкой номенклатуре материалов и режимов наплавки.

Ключевые слова: аддитивное электродуговое выращивание (WAAM), предиктивный контроль, in-situ-мониторинг, акустическая эмиссия, глубокое обучение, фрактальный анализ, динамическая устойчивость, нелинейная динамика, многопараметрическая диагностика, рекуррентная нейронная сеть (RNN), фазовый портрет, интеллектуальное управление, качество наплавки

Исследование выполнено в рамках гранта РНФ № 25-19-00534 «Разработка научных основ усталостного разрушения послойно модифицированных композиционных материалов, полученных аддитивной электродуговой наплавкой».

© Аносов М.С., Шатагин Д.А., Баевский А.А., Подувальцев А.А., Архипов М.В., Ямгулин Р.И., 2026

Для цитирования

Разработка комплексного подхода диагностики процессов сварки и аддитивного электродугового выращивания / Аносов М.С., Шатагин Д.А., Баевский А.А., Подувальцев А.А., Архипов М.В., Ямгулин Р.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 156-163. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-156-163>



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

DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED APPROACH TO THE DIAGNOSTICS OF WELDING AND WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING PROCESSES

Anosov M.S., Shatagin D.A., Baevsky A.A., Poduval'tsev A.A., Arkhipov M.V., Yamgulin R.I.

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The paper addresses the pressing issue of ensuring the stability and quality of the wire arc additive manufacturing (WAAM) process, which limits its widespread implementation in critical manufacturing applications. Conventional non-destructive testing methods, applied after the completion of the process, do not allow timely process adjustment. **Objectives.** The study is aimed at developing an integrated diagnostic approach based on in-situ monitoring for predictive process control. For this purpose, a method for synchronous multiparametric recording of key physical fields has been proposed, including electrical arc characteristics (voltage and current) and acoustic emission (AE) signals. During the experimental studies, wall-shaped specimens have been deposited while the corresponding data have been recorded simultaneously. The analysis has included the construction of spectrograms and phase portraits (energy-acoustic attractors), as well as the evaluation of their fractal dimensions to identify indicators of process stability and defect formation. **Originality.** The novelty of the study lies in the integration of multiparametric data and the application of deep neural network models for real-time data analysis. A comparative analysis of various architectures, including convolutional and recurrent neural networks, has been performed to classify process states based on raw and processed signals. The best result, with an accuracy of 91%, has been achieved by a bidirectional recurrent neural network (BiLSTM) using pre-calculated nonlinear signal parameters (fractal dimension and spectral entropy) as key features. This enables the model to effectively identify subtle patterns preceding the loss of process stability. **Practical Relevance.** The study provides a basis for an intelligent predictive control system capable of forecasting process instability within fractions of a second. This paves the way for closed-loop adaptive control systems, which are critical for the industrial implementation of WAAM, enabling both quality control and real-time optimization of process parameters. Further development will involve integrating the trained model into the process control system and validating the proposed approach across a wider range of materials and deposition parameters.

Keywords: wire arc additive manufacturing (WAAM), predictive control, in-situ monitoring, acoustic emission, deep learning, fractal analysis, dynamic stability, nonlinear dynamics, multiparametric diagnostics, recurrent neural network (RNN), phase portrait, intelligent control, deposition quality.

The study was carried out within the framework of the Russian Science Foundation (RSF) Grant No. 25-19-00534, "Development of the Scientific Foundations of Fatigue Fracture of Layer-by-Layer Modified Composite Materials Produced by Wire Arc Additive Manufacturing".

For citation

Anosov M.S., Shatagin D.A., Baevsky A.A., Poduval'tsev A.A., Arkhipov M.V., Yamgulin R.I. Development of an Integrated Approach to the Diagnostics of Welding and Wire Arc Additive Manufacturing Processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 156-163. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-156-163>

Введение

Современное промышленное производство предъявляет все более высокие требования к эффективности, гибкости и качеству изготовления сложных металлических изделий и компонентов. В этом контексте аддитивные технологии, в частности метод электродугового выращивания (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM), открывают новые перспективы для создания крупногабаритных деталей со сложной геометрией, обладающих свойствами, близкими к литым или деформированным заготовкам [1]. Однако широкое внедрение WAAM в ответственные производства сдерживается вызовами, связанными с обеспечением стабильности технологического процесса и гарантированным качеством формируемого изделия.

Неоднородность теплообмена, остаточные напряжения, возможные дефекты формирования наплаваемых слоев (поры, непровары, неравномерность валика) требуют разработки надежных систем оперативного контроля и диагностики [2].

Традиционные методы неразрушающего контроля, применяемые постфактум, не позволяют оперативно корректировать процесс, что ведет к потенциальному браку и увеличению себестоимости [3]. В связи с этим актуальной становится задача разработки методов in-situ-мониторинга, обеспечивающих непрерывный контроль в реальном времени по косвенным, но информативным признакам. Ключевыми технологическими параметрами, несущими интегральную информацию о физике процесса плавления,

переноса металла, стабильности дуги и формирования шва, являются электрические характеристики сварочной дуги – напряжение и сила тока. Их анализ позволяет судить об энергетическом балансе и грубых нарушениях режима [4].

Для получения более тонкой информации о динамических процессах в зоне плавления, таких как зарождение и развитие микронеоднородностей, кристаллизация металла, возникновение микротрещин, эффективно применение метода акустической эмиссии (АЭ). АЭ-сигналы, генерируемые быстрыми перераспределениями напряжений внутри материала, являются высокочувствительным индикатором активных дефектообразующих процессов [5].

Таким образом, целью настоящего исследования является разработка комплексного подхода к диагностике процесса сварки и наплавки при аддитивном электродуговом выращивании на основе синхронной многопараметрической регистрации и корреляционного анализа ключевых физических полей процесса: электрических параметров (напряжения и силы тока сварочной дуги) и сигналов акустической эмиссии. Синхронизация данных во времени позволит установить причинно-следственные связи между изменениями режима, событиями, регистрируемыми АЭ, и формируемыми дефектами, что является основой для создания интеллектуальной системы предиктивного контроля и управления процессом WAAM [6]. В статье представлены методика эксперимента, результаты анализа синхронных данных и оценка диагностических возможностей предложенного подхода.

Экспериментальные исследования. Анализ результатов эксперимента

Исследования проводились на примере наплавки стенок из сплава типа 09Г2С, в том числе при наплавке стенок, легированных порошком для повышения механических свойств [7].

Наплавка производилась на стенде, показанном на рис. 1.

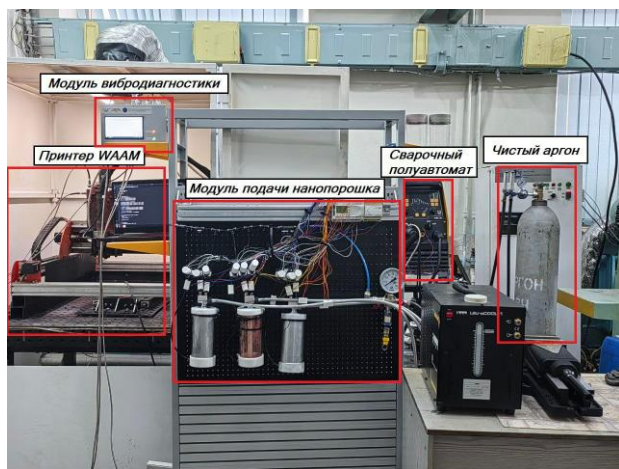


Рис. 1. Стенд для наплавки
Fig. 1. Deposition setup

Для осуществления поставленной цели данного проекта на первом этапе осуществлялось электродуговое выращивание образцов в виде стенок длиной 70 мм и высотой 6 слоев (12–15 мм) в среде защитного газа. В ходе процесса осуществлялась синхронная фиксация таких параметров, как напряжение, сила тока сварочной дуги и сигналы акустической эмиссии (АЭ), необходимых для последующего построения аттракторов динамической системы (рис. 2).



Рис. 2. Пример печати образца с регистрацией сигнала АЭ
Fig. 2. Example of specimen printing with acoustic emission signal recording

Полученные сигналы сохранялись в формате временных рядов, предварительно обработанных с помощью полосовой фильтрации и вейвлет-анализа. В рамках выполнения работ для каждого из наплавленных слоев выполнялось построение спектрограмм, основанных на зарегистрированных сигналах тока, напряжения и АЭ. Параллельно проводилась реконструкция энергоакустического портрета данной системы. Примеры полученных спектрограмм, энергоакустических портретов системы 3D-печати приведен на рис. 3 и 4.

Определено, что на динамическую устойчивость процесса 3D-печати в значительной степени оказывает влияние величины подводимой удельной энергии (режимы наплавки). При этом происходит изменение статистических параметров сигналов напряжения, силы тока электрической дуги и сигнала АЭ, а также перестройка энергоакустического портрета системы с соответствующими изменениями значения его фрактальной размерности [8].

Установлено, что при устойчивом процессе 3D-печати и стабильном переносе материала короткими замыканиями акустические эффекты на спектрограмме проявляются в районе максимума энергии наплавки или немного смещены во времени. При установившихся коротких замыканиях изменение энергии системы 3D-печати и перенос материала носят периодический характер, а энергоакустический портрет близок к аттрактору с двумя предельными циклами (состояниями равновесия). Данные фазовые траектории являются устойчивыми, о чем свидетельствует отрицательный старший показатель Ляпунова, а переход между состояниями равновесия не является случайным, а носит строго периодический характер. При этом больший предельный цикл соответствует одному периоду переноса энергии (розжиг, горение

электрической дуги, короткое замыкание), а меньший предельный цикл – переходным процессам в дуге в пределах одного короткого замыкания. В районе малого предельного цикла также наблюдается максимум всплесков акустических явлений. С каждым последующим слоем 3D-печати происходит возрастание

количества акустических явлений по всему объему энергоакустического портрета. При этом наблюдается незначительный рост фрактальной размерности. Установлено, что примерно к 5-му слою происходит насыщение энергоакустического сигнала импульсами АЭ, и фрактальная размерность перестает расти.

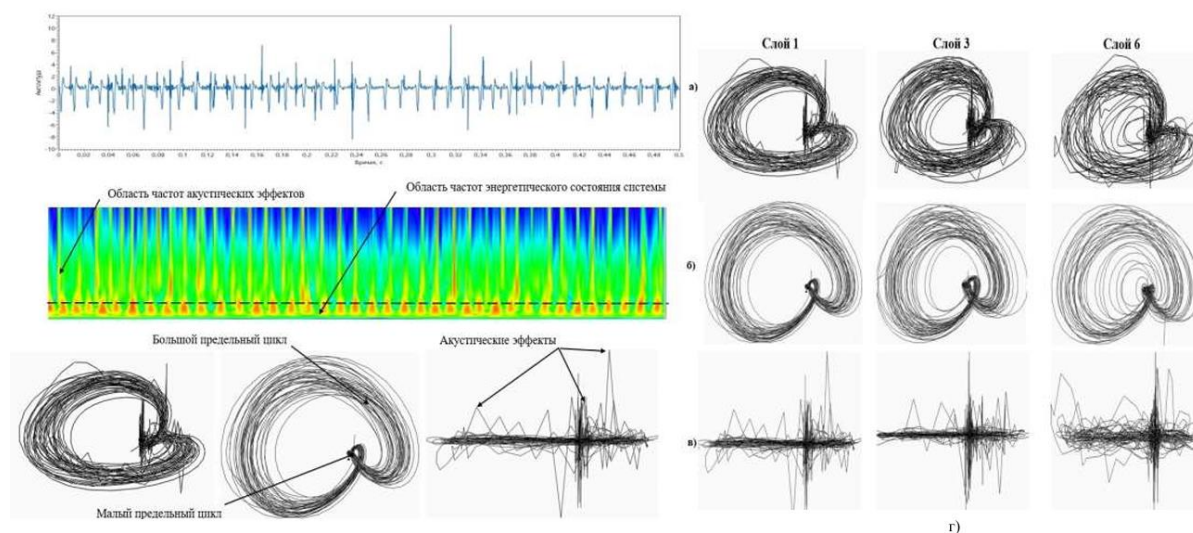


Рис. 3. Графические представления данных при устойчивой 3D-печати: а – осциллограмма; б – спектрограмма; в – проекции фазового портрета энергоакустического сигнала; г – сравнительный анализ энергоакустических портретов для разных слоев заготовки

Fig. 3. Graphical representations of data for stable 3D printing: а is oscillogram; б is spectrogram; в is projections of the phase portrait of the energy-acoustic signal; г is comparative analysis of energy-acoustic portraits for different layers of the specimen

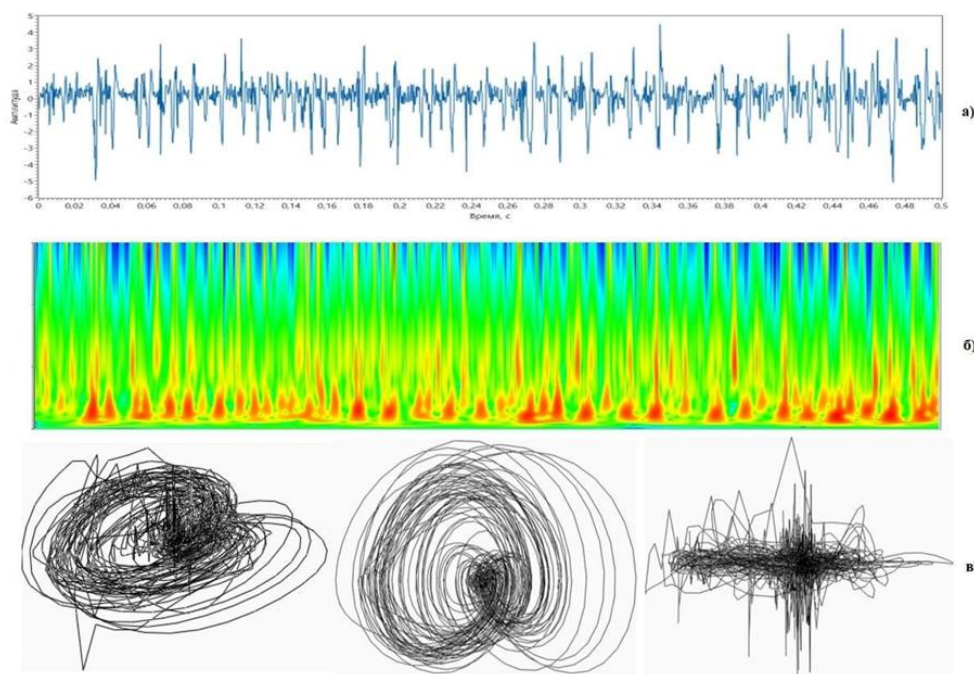


Рис. 4. Графические представления данных при потере устойчивости процесса 3D печати: а – осциллограмма; б – спектрограмма; в – проекции фазового портрета энергоакустического сигнала

Fig. 4. Graphical representations of data for loss of stability of the 3D printing process: а is oscillogram; б is spectrogram; в is projections of the phase portrait of the energy-acoustic signal

Как показали результаты наплавки, потеря динамической устойчивости процесса 3D-печати возможна на заведомо стабильных режимах, вследствие изменения параметров системы в процессе функционирования. При этом наблюдается также перестройка энергоакустического портрета с изменением его фрактальной размерности, а основным сценарием перехода системы к хаотической динамике является перемежаемость и удвоение периода коротких замыканий. Потеря устойчивости процесса наплавки приводит к возникновению дефектов в виде пор, зашлакованности и непроплавления [9].

Далее полученные энергоакустические сигналы процесса на различных режимах наплавки были разделены на заведомо устойчивые и неустойчивые и сохранялись в базу данных для их последующей обработки.

Разработка нейросетевой модели для обработки и анализа многопараметрических данных

Для реализации предиктивного контроля процесса аддитивного электродугового выращивания на основе синхронно регистрируемых данных (электрические параметры дуги и сигналы акустической эмиссии) требуется создание модели, способной выявлять сложные нелинейные зависимости, корреляции и признаки зарождающихся дефектов в реальном времени. Традиционные методы анализа (спектральный, фрактальный, фазово-портретный) эффективны для описания процесса, но обладают ограниченной применимостью для оперативного прогнозирования и классификации состояний в условиях изменчивости режимов и материалов. В связи с этим предлагается использовать глубокую нейронную сеть, способную автоматически извлекать значимые признаки из многомерных временных рядов и выполнять классификацию состояния процесса (устойчивое/неустойчивое) с вероятностной оценкой, а также регрессионный анализ для прогнозирования ключевых параметров (например, фрактальной размерности, уровня дефектности) [10].

Архитектура нейросетевой модели. Предлагается гибридная архитектура, сочетающая сверточные нейронные сети (CNN) для анализа локальных паттернов в сигналах и долгую краткосрочную память (LSTM) для учета временных зависимостей и динамики процесса [11]. Модель состоит из следующих основных блоков:

1) *Входной слой:* принимает синхронные многоканальные временные ряды фиксированной длины (сегменты данных), включающие:

- нормализованные значения мгновенного напряжения дуги;
- нормализованные значения мгновенного тока дуги;
- оцифрованный и предварительно обработанный (полосовая фильтрация, вейвлет-денойзинг) сигнал акустической эмиссии;

– (опционально) мета-признаки: номер слоя, удельная энергия, скорость подачи проволоки.

2) *Блок параллельной обработки сигналов:*

– ветвь CNN: два-три сверточных слоя с функциями активации ReLU, предназначенные для выделения локальных пространственно-временных признаков в каждом канале (например, всплески напряжения, характерные формы импульсов АЭ). Применяется операция max-pooling для снижения размерности и повышения инвариантности к небольшим временным сдвигам;

– ветвь LSTM: одно- или двухслойный LSTM-блок, обрабатывающий каждый временной ряд для моделирования долгосрочных зависимостей и динамической эволюции системы (например, периодичность коротких замыканий, накопление эффектов от слоя к слою).

3) *Блок объединения и глубокой обработки:*

– выходы CNN и LSTM объединяются (конкатенируются) в единый вектор признаков высокого уровня;

– полученный вектор пропускается через несколько полносвязных (Dense) слоев с функцией активации ReLU и dropout-регуляризацией для предотвращения переобучения. Эти слои отвечают за комбинирование признаков из разных источников данных.

4) *Выходной блок (многозадачный):*

– классификационный выход: полносвязный слой с одним нейроном и сигмоидальной активацией для бинарной классификации: «0» – устойчивый процесс, «1» – неустойчивый процесс (или с признаками дефектообразования);

– регрессионный выход: полносвязный слой с линейной активацией для прогнозирования непрерывных значений, таких как оценка фрактальной размерности энергоакустического портрета или индекс потенциальной дефектности.

5) *Обучение:* модель будет обучаться на размеченных данных из созданной базы «устойчивых» и «неустойчивых» режимов. В качестве функции потерь будет использоваться комбинированная: Binary Cross-Entropy для классификации и Mean Squared Error для регрессии. Оптимизатор – Adam.

Ожидаемые преимущества и применение модели. *Автоматизация анализа:* модель позволит в реальном времени обрабатывать поток данных без необходимости ручного построения спектрограмм и фазовых портретов для каждой сессии.

Ранняя диагностика: способность выявлять тонкие изменения в корреляциях между электрическими и акустическими сигналами, предшествующие видимой потере устойчивости или появлению дефектов [12].

Адаптивность: после дообучения на новых данных модель может быть адаптирована для работы с различными материалами (сплавами) и геометриями наплавки.

Интеграция в систему управления: выходы модели (вероятность неустойчивости, прогнозируемые

параметры) могут служить входными сигналами для системы адаптивного управления процессом WAAM, позволяя вносить коррективы в режимы (ток, скорость) для компенсации отклонений.

Предложенная гибридная нейросетевая модель представляет собой логичное развитие комплексного диагностического подхода, переводя его из области описательного анализа в область интеллектуального предиктивного контроля. Ее внедрение позволит создать замкнутый контур управления процессом аддитивного электродугового выращивания, что является ключевым шагом на пути к его широкому промышленному применению для изготовления ответственных изделий. Следующим этапом исследования станет реализация данной архитектуры, обучение на экспериментальных данных, валидация и сравнение ее эффективности с традиционными методами диагностики.

В ходе исследований была предложена следующая структура нейросетевой модели прогнозирования динамики процесса электродуговой наплавки и представлена на **рис. 5**.

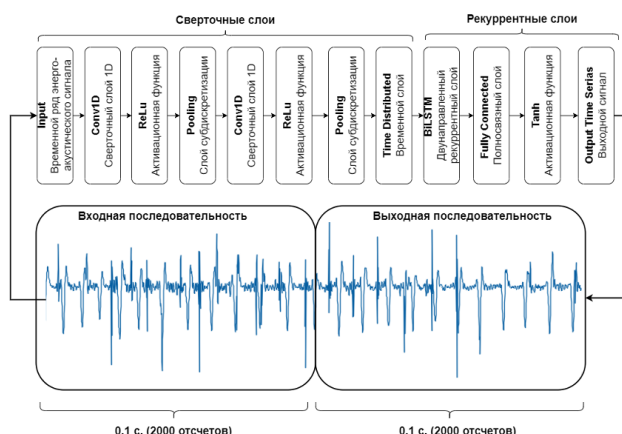


Рис. 5. Архитектура и принцип работы модели ConvBiLSTM

Fig. 5. Architecture and operating principle of the ConvBiLSTM model

В рамках выполнения работ была предложена и протестирована глубокая двунаправленная рекуррентная нейросетевая архитектура, предназначенная для диагностики (то есть бинарной классификации) динамической устойчивости при 3D-печати методом электродуговой наплавки. Модель строит прогноз устойчивости системы на ближайшие 0,1 с, опираясь на данные, полученные за предшествующий 0,2-секундный интервал. В качестве входных признаков используются два нелинейных параметра, рассчитанных по энергоакустическому сигналу: фрактальная размерность и спектральная энтропия. Эти параметры вычисляются с применением скользящего окна длиной 0,1 с (200 отсчетов) с определенным шагом, что позволяет сформировать двумерный массив данных. На выходе нейросеть выдаёт один из двух классов: «1» — устойчивый режим печати, «0» — неустойчи-

вый. Таким образом решается задача бинарной классификации типа sequence-to-label.

Применение скользящего окна с минимальным шагом обеспечивает детализированное отслеживание эволюции нелинейных характеристик сигнала в реальном времени, что критически важно для своевременного выявления признаков дестабилизации процесса. Конечная версия модели показала точность (accuracy) 91 % на обучающей выборке.

Для сравнения были протестированы альтернативные архитектуры:

1) ConvBiLSTM – гибридная модель с двумя свёрточными слоями на входе. Такая конфигурация позволяет отказаться от предварительного вычисления фрактальных характеристик и спектральной энтропии, обрабатывая исходный сигнал напрямую. Однако её точность оказалась ниже – 78%. Хотя эта модель наиболее ресурсоёмка при обучении, в процессе инференса она демонстрирует высокую производительность на встраиваемых платформах (например, NVIDIA Jetson), поскольку не требует дополнительной предобработки данных.

2) Модель с одномерным входом – использовался только временной ряд значений фрактальной размерности (рассчитанный аналогичным способом с помощью скользящих окон). Точность составила 88%.

3) Обработка «сырого» сигнала без предварительного извлечения признаков – прямая подача энергоакустического сигнала на рекуррентные слои привела к наименьшему качеству: 52%.

Выводы

В представленной работе успешно разработан и исследован комплексный подход к диагностике процесса аддитивного электродугового выращивания (WAAM). Подход основан на синхронной регистрации и корреляционном анализе ключевых физических полей процесса: электрических параметров дуги (напряжение, ток) и сигналов акустической эмиссии (АЭ).

1) Экспериментально установлены диагностические признаки устойчивого и неустойчивого режимов наплавки через анализ спектрограмм, фазовых портретов и их фрактальной размерности. Показано, что потеря устойчивости связана с переходом к хаотической динамике (удвоение периода, перемежаемость) и ведет к образованию дефектов.

2) Основным научно-практическим результатом является разработка и сравнительный анализ глубоких нейросетевых моделей для предиктивного контроля. Наилучший результат (точность 91%) показала модель на основе двунаправленной рекуррентной сети, использующая в качестве входных признаков предварительно рассчитанные нелинейные параметры энергоакустического сигнала – фрактальную размерность и спектральную энтропию.

3) Предложенное решение позволяет перейти от описательного анализа к интеллектуальной системе реального времени, способной прогнозировать поте-

рю устойчивости процесса за десятки доли секунды до её возникновения. Это открывает путь к созданию систем адаптивного управления с замкнутым контуром, что является критически важным для широкого внедрения WAAM в ответственные производства.

Список источников

1. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement / Wu B., Pan Z., Ding D., Cuiuri D., Li H., Xu J., Norrish J. // *Journal of Manufacturing Processes*. 2018, vol. 35, pp. 127–139. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001.
2. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM) / Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2015, vol. 31, pp. 101–110.
3. Usability of arc types in industrial welding / Kah P., Latifi H., Suoranta R., Martikainen J., Pirinen M. // *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2014, vol. 9, no. 1, pp. 15. DOI: 10.1186/s40712-014-0015-6.
4. Bead geometry prediction for robotic GMAW-based rapid manufacturing through a neural network and a second-order regression analysis / Xiong, J., Zhang, G., Hu, J. et al. // *J Intell Manuf* 25, 2014, pp.157–163 (). <https://doi.org/10.1007/s10845-012-0682-1>.
5. Acoustic emission for in situ quality monitoring in additive manufacturing using spectral convolutional neural networks / Shevchik S.A., Kenel C., Leinenbach C., Wasmer K. // *Additive Manufacturing*. 2017, vol. 27, pp. 598–604. 10.1016/j.addma.2017.11.012.
6. Additive manufacturing of functionally graded materials: A review / Zhang C., Chen F., Huang Z., Jia M., Chen G., Ye Y., Lin Y., Liu W., Chen B., Shen Q., Zhang L., Lavernia E.J. // *Materials Science and Engineering: A*. 2019, vol. 764, 138209.
7. Optimization of surface appearance for wire and arc additive manufacturing of Bainite steel / F. Youheng [et al.] // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017, vol. 91, no. 1-4, pp. 301-313.
8. Wang Z., Palmer T.A., Beese A.M. Effect of processing parameters on microstructure and tensile properties of austenitic stainless steel 304L made by directed energy deposition additive manufacturing // *Acta Materialia*. 2016, vol. 110, pp. 226–235. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.03.019.
9. Printability of alloys for additive manufacturing / Mukherjee T., Zuback J.S., De A., DebRoy T. // *Scientific Reports*. 2016, vol. 6 (1), 19717. DOI:10.1038/srep19717.
10. Tribological characterisation in dry sliding conditions of compocasted hybrid A356/SiCp/Grp composites with graphite macroparticles / Vencl A., Vučetić F., Bobić B., Pitel J., Bobić I. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019, vol. 100, 2135-2146.
11. Machine learning in additive manufacturing: State-of-the-art and perspectives / Wang C., Tan X.P., Tor S.B., Lim C.S. // *Additive Manufacturing*. 2020, vol. 36, 101538. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101538
12. Liu S., Shin Y.C. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review // *Materials & Design*. 2018, vol. 164, 107552. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.107552.

References

1. Wu B., Pan Z., Ding D., Cuiuri D., Li H., Xu J., Norrish J. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018;35:127-139. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001.
2. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2015;31:101-110.
3. Kah P., Latifi H., Suoranta R., Martikainen J., Pirinen M. Usability of arc types in industrial welding. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2014;9(1):15. DOI:10.1186/s40712-014-0015-6.
4. Xiong J., Zhang G., Hu J. et al. Bead geometry prediction for robotic GMAW-based rapid manufacturing through a neural network and a second-order regression analysis. *J Intell Manuf*. 2014;25:157-163. <https://doi.org/10.1007/s10845-012-0682-1>.
5. Shevchik S.A., Kenel C., Leinenbach C., Wasmer K. Acoustic emission for in situ quality monitoring in additive manufacturing using spectral convolutional neural networks. *Additive Manufacturing*. 2017;27:598-604. 10.1016/j.addma.2017.11.012.
6. Zhang C., Chen F., Huang Z., Jia M., Chen G., Ye Y., Lin Y., Liu W., Chen B., Shen Q., Zhang L., Lavernia E.J. Additive manufacturing of functionally graded materials: A review. *Materials Science and Engineering: A*. 2019;764:138209.
7. Youheng F et al. Optimization of surface appearance for wire and arc additive manufacturing of Bainite steel. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017;91(1-4):301-313.
8. Wang Z., Palmer T.A., Beese A.M. Effect of processing parameters on microstructure and tensile properties of austenitic stainless steel 304L made by directed energy deposition additive manufacturing. *Acta Materialia*. 2016;110:226-235. doi: 10.1016/j.actamat.2016.03.019.
9. Mukherjee T., Zuback J.S., De A., DebRoy T. Printability of alloys for additive manufacturing. *Scientific Reports*. 2016;6(1):19717. DOI:10.1038/srep19717.
10. Vencl A., Vučetić F., Bobić B., Pitel J., Bobić I. Tribological characterisation in dry sliding conditions of compocasted hybrid A356/SiCp/Grp composites with graphite macroparticles. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;100:2135-2146.
11. Wang C., Tan X.P., Tor S.B., Lim C.S. Machine learning in additive manufacturing: State-of-the-art and perspectives. *Additive Manufacturing*. 2020;36:101538. DOI:10.1016/j.addma.2020.101538
12. Liu S., Shin Y.C. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. *Materials & Design*. 2018;164:107552. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.107552.

Поступила 02.03.2026; принята к публикации 31.08.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 02/03/2025; revised 31/08/2026; published 30/09/2026

Аносов Максим Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора ИПТМ, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
ORCID 0000-0001-8150-9332

Шатагин Дмитрий Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «ТиОМ» ИПТМ, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. ORCID 0000-0003-1293-4487

Баевский Анатолий Аркадьевич – старший преподаватель ИПТМ, инженер-программист ЦРПР, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. Email: Baevsky1990@gmail.com. ORCID 0009-0003-1648-5276

Подувальцев Алексей Александрович – аспирант, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. ORCID 0000-0003-4285-8980

Архипов Максим Владимирович – аспирант, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.

Ямгулин Роман Иршатович – аспирант, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. ORCID 0009-0009-5868-5579

Maxim S. Anosov – PhD (Eng.), Associate Professor, Deputy Director of Institute of Industrial Technologies of Mechanical Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia. ORCID 0000-0001-8150-9332.

Dmitry A. Shatagin – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Technology and Equipment of Mechanical Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia. ORCID 0000-0003-1293-4487

Anatoly A. Baevsky – Senior Lecturer of Institute of Industrial Technologies of Mechanical Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia. Email: Baevsky1990@gmail.com. ORCID 0009-0003-1648-5276

Alexey A. Poduvaltsev – Postgraduate Student, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia. ORCID 0000-0003-4285-8980

Maxim V. Arkhipov – Postgraduate Student, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.

Roman I. Yamgulin – Postgraduate Student, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia. ORCID 0009-0009-5868-5579

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.735.016.2
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-164-170



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОСКОГО АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ СТАТОРОВ (РОТОРОВ) КОНДЕНСАТОРОВ ПЕРЕМЕННОЙ ЕМКОСТИ И ПОДЛОЖЕК ДЛЯ МИКРОСХЕМ НА СТАНКЕ МОДЕЛИ 3102А

Колодяжный Д.Ю.¹, Шабалин Д.Н.², Ларионов Е.О.², Козарь И.И.²

¹Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия

²Институт машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Рассмотрены вопросы, возникающие при обработке керамических радиодеталей, так как к ним предъявляются высокие требования по точности размеров и формы, шероховатости и состоянию поверхностного слоя. Процессы шлифования технической керамики недостаточно полно описаны в литературе, сведений о режимах резания, свойствах абразивных кругов также крайне мало. В связи с этим и были проведены эксперименты по шлифованию деталей.

Ключевые слова: шлифование, керамика, точность размеров и формы

© Колодяжный Д.Ю., Шабалин Д.Н., Ларионов Е.О., Козарь И.И., 2026

Для цитирования

Экспериментальное исследование плоского алмазного шлифования статоров (роторов) конденсаторов переменной емкости и подложек для микросхем на станке модели 3102А / Колодяжный Д.Ю., Шабалин Д.Н., Ларионов Е.О., Козарь И.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 164-170. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-164-170>



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

EXPERIMENTAL STUDY OF SURFACE DIAMOND GRINDING OF STATORS (ROTORS) OF ADJUSTABLE CAPACITORS AND MICROCHIP SUBSTRATES ON A MODEL Z102A GRINDING MACHINE

Kolodyazhnyi D.Yu.¹, Shabalin D.N.², Larionov E.O.², Kozar I.I.²

¹ Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, Russia

² Institute of Mechanical Engineering, Materials, and Transport, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The paper considers issues arising in the machining of ceramic radio components, which are subject to stringent requirements for dimensional and geometric accuracy, surface roughness, and surface-layer condition. The grinding processes of technical ceramics have not been sufficiently described in the literature, and there is very limited information on cutting parameters and the properties of abrasive wheels. Therefore, experiments have been conducted to investigate the grinding of these components.

Keywords: grinding, ceramics, dimensional and geometric accuracy

For citation

Kolodyazhnyi D.Yu., Shabalin D.N., Larionov E.O., Kozar I.I. Experimental Study of Surface Diamond Grinding of Stators (Rotors) of adjustable Capacitors and Microchip Substrates on a Model Z102A Grinding Machine. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 164-170. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-164-170>

Введение

При механической обработке керамических радиодеталей наиболее трудоемкими являются роторы и статоры подстроечных и переменных конденсаторов и подложки микросхем. Данный вопрос давно не рассматривался в литературе в связи со спецификой обработки [6, 8–10]. Это объясняется тем, что к ним предъявляются высокие требования по точности размеров и формы, шероховатости и состоянию поверхностного слоя. Вместе с тем потребность народного хозяйства в этих типах керамических деталей значительна, поэтому работы в области рационализации их технологии изготовления являются актуальными [4].

Сравнительно миниатюрные размеры (по толщине) этих изделий, высокая точность обуславливают сложность их изготовления, а следовательно, и трудоемкость. Изготовление этих изделий в данное время производится в экспериментальных условиях на оборудовании и по технологии, не соответствующим требованиям массового производства. Так, трудоемкость механической обработки (шлифование, доводка, полирование) подложки размерами 20×16×0,5 мм и пластин статора составляет ~ 23% от штучного времени. Остальное время (77%) затрачивается на крепление, съем, контроль и прочие вспомогательные операции. Некоторые рекомендации приведены в [1]. Похожие вопросы в свое время рассматривались Филимоновым Л.Н. [7].

Технология изготовления керамических заготовок, очевидно, также нуждается в глубоком анализе, так как большие припуски на обработку (1,5–2 мм) из-за их деформированного состояния вызывают увеличение объема механической обработки.

В настоящее время в производстве используется большое количество масс керамики с различными физико-механическими свойствами, влияющими на обрабатываемость и на состояние поверхностного слоя шлифуемых изделий (сколы, вырывы, микротрещины и др.), что снижает качество выпускаемой продукции. Методика разрушения различных типов керамики рассмотрена в работе Никиткова Н.В. [4].

Очевидно, что в дальнейшем на основании накопленных экспериментальных данных об обрабатываемости потребуется ограничение числа марок масс.

Анализ схемы резания на станке 3102А

В существующем исполнении станок 3102А выполнен с координатами $X \cong 220$ мм, $y \cong 130$ мм положения осей шпинделей относительно оси кассеты (рис. 1). При такой схеме станка при шлифовании осуществляется нелинейная нормальная подача (см. рис. 1, кривая 1), изменяющаяся от 3,3 мкм/с в начале обработки до 33 мкм/с в конце обработки. При расположении кругов относительно кассеты по схеме II обеспечивается линейная нормальная подача, равная ≈ 20 мкм/с. Как видно из графика (кривая 1), интенсивное нарастание нормальной подачи осуществляется примерно с середины зоны резания, начиная с 9-й секунды. Из теории шлифования известно, что для получения высокого качества поверхности в конце обработки необходимо предусматривать затухающую подачу и выхаживание. Этим условиям схема станка 3102А не удовлетворяет.

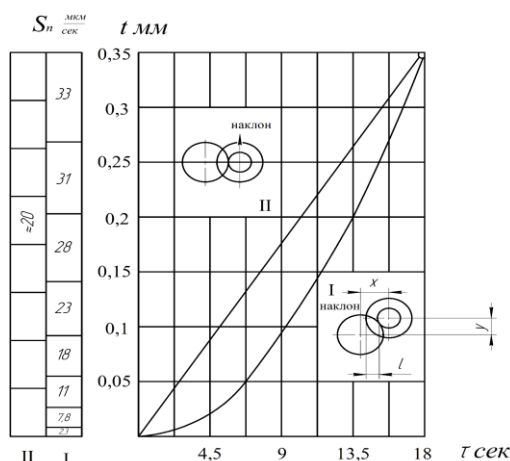
В используемой схеме настройки станка на величину снимаемого припуска на расстоянии l (см. рис. 1) устанавливаются концевые меры с перепадом раз-

меров, равным припуску, например 0,35 мм. При этом угол наклона шпинделя равен

$$\tan \alpha = \frac{t}{l} = \frac{0,35}{70} = 0,005 \alpha = 16'.$$

При шлифовании деталей из-за наклона шлифовального круга образуется клиновидность. Перепад размеров толщины деталей из-за клиновидности в пределах диаметра подложки 25 мм равен

$$\Delta = 25 \cdot \tan \alpha = 25 \cdot 0,005 = 0,125 \text{ мм.}$$



Условия эксперимента			
Режимы резания			Марка шлифов. круга
П _н	П _п	l	
3000	0,6	0,35	АСП10М1

Рис. 1. Результаты эксперимента после настройки станка

Fig. 1. Experimental results after machine setup

В процессе исследований при условиях, указанных на рис. 1, установлено, что примерно в середине зоны резания осуществляется проворот подложки относительно своей оси. Он сопровождается характерным шумом. При повороте подложки на 180° относительно окружной подачи из-за вращения кассеты почти мгновенно добавляется величина $\Delta = 0,125$ мм. Естественно, это должно привести к возникновению сколов, трещин и ухудшению качества обрабатываемой поверхности.

Методика проведения исследований

Исследование процесса чернового шлифования производилось на станке 3102А, имеющем скорость резания 47 м/с при диаметре алмазного круга 300 мм. Были использованы образцы из керамики с различными физико-механическими свойствами: Т-150, ТЛ-75, И-65, Ф-58. Размеры образцов: диски $D \times d \times t_0 = 7,5 \times 2 \times 1,2$, пластины $B \times b \times t = 17 \times 17 \times 2, 24 \times 30 \times 2 \div 4, 30 \times 48 \times 2 \div 4$.

При проверке результатов работы применялась методика, приведенная в [2]. Обработка деталей на станке 3102А производилась при двух схемах крепления заготовок на металлической подложке: 1) при помощи клея; 2) силами резания. Наклеенные на под-

ложки детали предварительно шлифовались на станке ЗГ71М в один уровень.

С целью расширения технологических возможностей станка проведена модернизация, позволившая получить скорости резания 47, 35, 23,5 м/с при числе оборотов шпинделя соответственно 3000, 2250, 1500 об/мин. Режущий инструмент – алмазный круг АСП10М1-150, $300 \times 50 \times 200 \times 3$.

Шероховатость поверхности после шлифования измерялась на профилографе-профилометре «Калибр» и оценивалась по R_a точность размеров и формы индикатором с ценой деления 0,01 мм, а величина сколов – на микроскопе МБС-1 [3].

Результаты экспериментальных исследований

На первом этапе изучалось влияние скорости шлифования на шероховатость поверхности и на образование сколов в зависимости от физико-механических свойств керамики.

На рис. 2 приведены кривые, характеризующие влияние числа оборотов (скорости резания) на шероховатость.

Выявлено, что увеличение скорости резания не приводит к заметному снижению шероховатости по R_a 0,4–3,2 мкм.

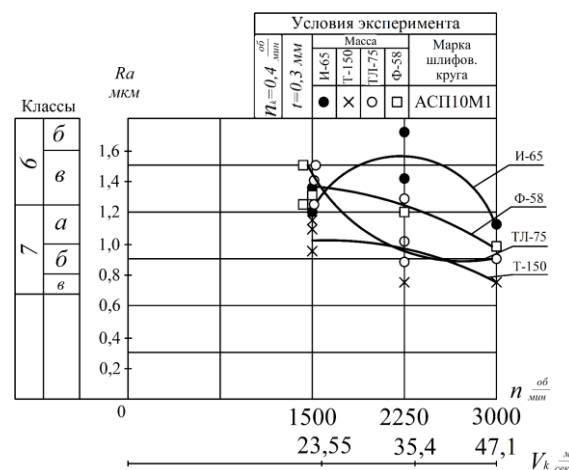


Рис. 2. Результаты по исследованию седловидности

Fig. 2. Results of the study of concavity

Рис. 3 иллюстрирует образование сколов на различных керамиках в зависимости от скорости шлифования. Оптимальной является скорость 35 м/с.

На рис. 4–6 приведены опытные (а) и теоретические (б) кривые нормального распределения размеров деталей с подложкой, характеризующие точность настройки станка. При существующем способе настройки на величину снимаемого припуска = 0,3 мм погрешность настройки.

Вариация размеров толщины деталей с подложкой 0,1 мкм. Погрешность обработки не превышает 0,03–0,05 мм. Точность размеров определялась в соответствии с [5].

Второй этап исследований посвящен выявлению влияния способов крепления деталей на образование сколов и точность формы обработанной поверхности.

При этом использовались оптимальные режимы резания, полученные в первом этапе исследований.

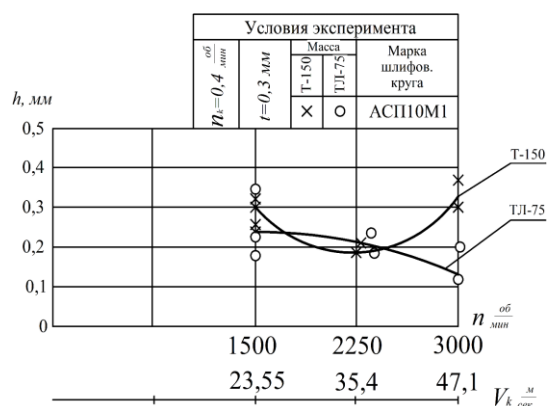


Рис. 3 Результаты по исследованию седловидности
Fig. 3. Results of the study of concavity

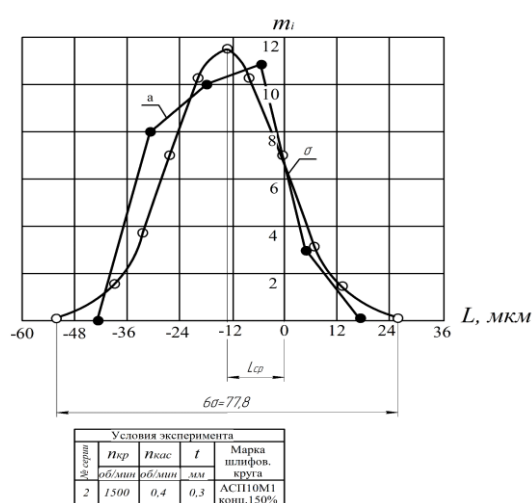


Рис. 4. Результаты по исследованию седловидности
Fig. 4. Results of the study of concavity

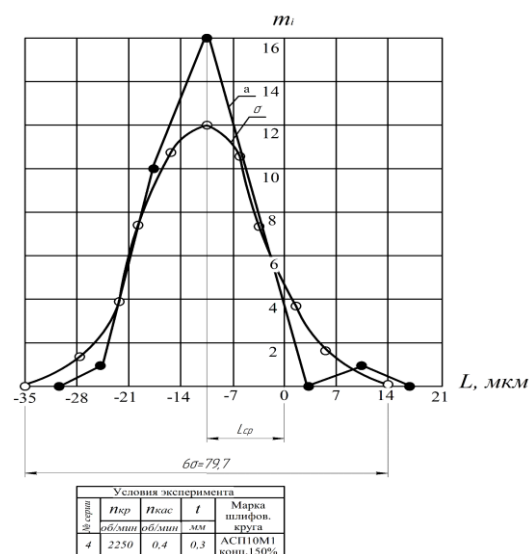


Рис. 5. Результаты по исследованию седловидности
Fig. 5. Results of the study of concavity

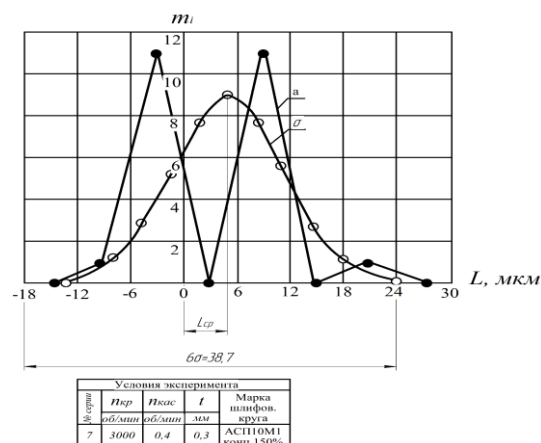


Рис. 6. Результаты по исследованию седловидности
Fig. 6. Results of the study of concavity

На рис. 7–9 представлены различные схемы крепления подложек с деталями, где 1 – кассета, 2 – шлифовальный круг, 3 – стол, 4 – подложка с заготовками. Исследования влияния способов крепления на образование сколов показали, что наилучшим является схема расположения грибовой подложки на кассете, скользящей по столу нижнего шпинделя. При этом достигается шероховатость R_a 0,2–0,8 мкм. Кроме того, величина сколов зависит от физико-механических свойств керамики. С увеличением $\sigma_{\text{н}}$ сколы уменьшаются.

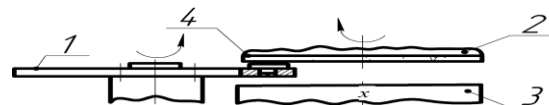


Рис. 7. Упругое крепление грибовой подложки
Fig. 7. Elastic mounting of the mushroom-shaped substrate

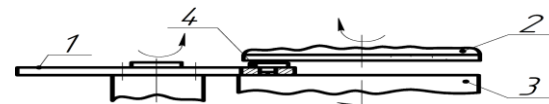


Рис. 8. Жесткое замыкание кассеты со столом
Fig. 8. Rigid clamping of the cassette to the bench

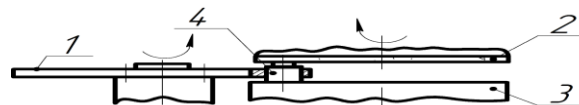


Рис. 9. Жесткое замыкание обычной подложки со столом
Fig. 9. Rigid clamping of the conventional substrate to the bench

С целью уменьшения погрешности формы были исследованы две схемы шлифования:

- 1) снятие припуска за один проход и три прохода выхаживания каждый раз с поворотом детали на 90° ;
- 2) снятие припуска за четыре прохода с постепенным уменьшением глубины резания.

Полученные результаты по исследованию седловидности приведены на рис. 2–6 и в таблице.

Таблица. Результаты по исследованию седловидности
Table. Results of the study of concavity

Рекомендуемая технологическая схема операции предварительного шлифования на станке модели 3102А		РТМ-1
Элементы	Ротор-статор	Подложки для микросхем
Предварительная операция	Сортировка по размерам	Шлифования в один уровень на станке 3Г71М
Припуск на обработку, мм	0,6	1,0
Способ крепления заготовки	Наклейка на подложку по 4 шт.	Наклейка на подложку по 1 шт.
Характеристика и размеры шлифовального круга	АСР10М1-150	300×50×200×3 мм
Настройка на размер за счет поворота шпиндельной бабки	По мерным плиткам	
Режимы шлифования:		
– число оборотов круга, об/мин		2250
– окружная скорость круга, м/с		35,4
Число оборотов кассеты, об/мин		0,4
Глубина шлифования, мм		0,3–0,35 *
Достижимая точность, мм		0,03–0,05
Погрешность формы (седловидность), мм		
– после 4-х проходов с поворотом детали		0,02–0,025
– после 4-х проходов с постепенным уменьшением глубины резания		0,02–0,025
Шероховатость поверхности, класс чистоты		8–9

* Для масс И-65; Ф-58; ТМ-14; ЦМ-4, $t = 0,5–0,7$ мм.

Влияние способов крепления на точность формы (седловидность) приведены на **рис. 10**.

Результаты влияния размеров детали на точность формы (седловидность) приведены на **рис. 11**.

Результаты экспериментов по влиянию глубины резания на точность формы (седловидность) приведены на **рис. 12**.

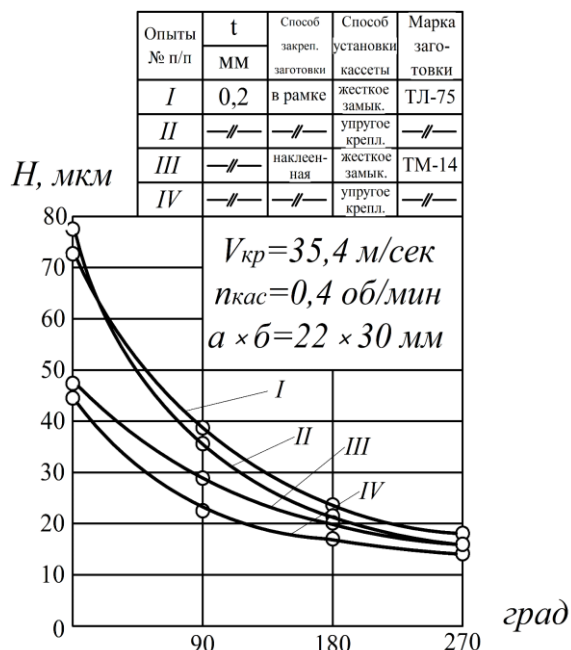


Рис. 10. Влияние способов крепления на точность формы (седловидность)
Fig. 10. Effect of mounting methods on form accuracy (concavity)

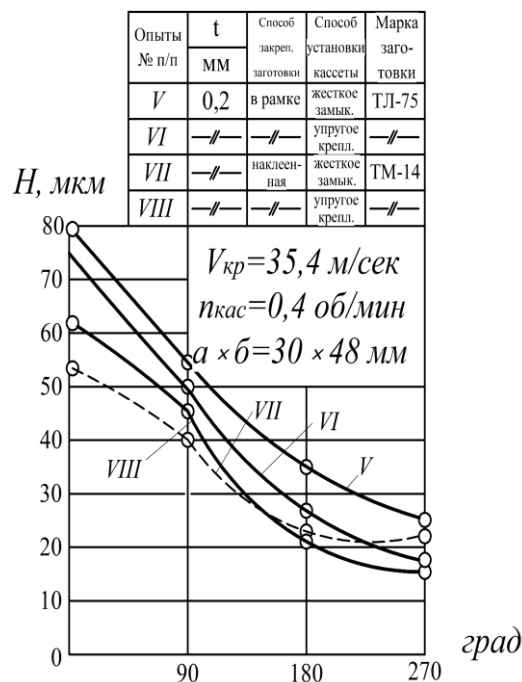


Рис. 11. Влияние размеров детали на точность формы (седловидность)
Fig. 11. Effect of component dimensions on form accuracy (concavity)

Результаты экспериментов по влиянию глубины резания на точность формы (седловидность) при постоянной круговой подаче приведены на **рис. 13**.

Результаты экспериментов по влиянию круговой подачи на точность формы (седловидность) с изменением глубины резания приведены на **рис. 14**.

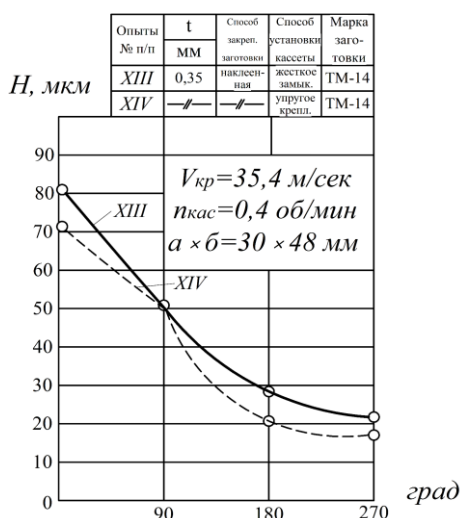


Рис. 12. Влияние глубины резания на точность формы (седловидность)

Fig. 12. Effect of grinding depth on form accuracy (concavity)

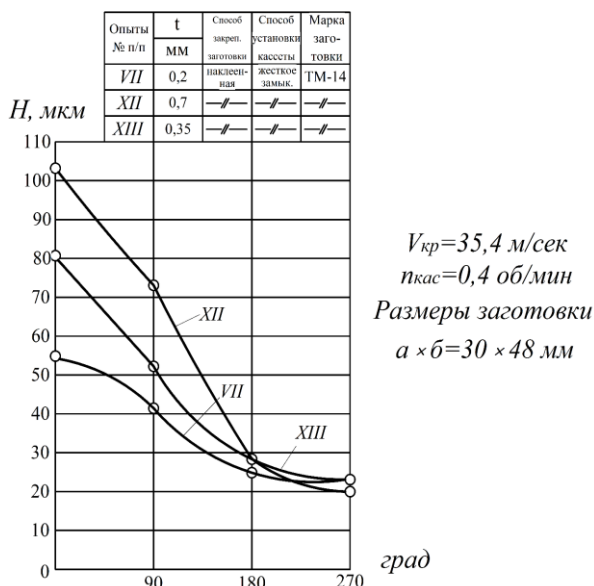


Рис. 13. Влияние глубины резания на точность формы (седловидность) при постоянной круговой подаче

Fig. 13. Effect of grinding depth on form accuracy (concavity) at a constant peripheral feed rate

Выводы

Как видно из графиков, шлифование по первой схеме приводит к седловидности не более 19 мкм, по второй схеме 20–23 мкм. С этой точки зрения обе схемы примерно равноценны. Кроме того, величина седловидности зависит от габаритов шлифуемых деталей (см. рис. 11).

По результатам исследований составлены руководящие технические материалы (РТМ-1) по шлифованию деталей на станке 3102А.

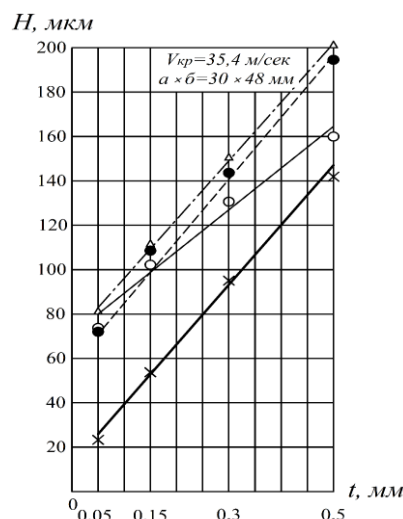


Рис. 14. Влияние круговой подачи на точность формы (седловидность) с изменением глубины резания

Fig. 14. Effect of peripheral feed rate on form accuracy (concavity) with varying grinding depth

Список источников

1. Шлифовальные и режущие инструменты на основе алмаза и нитрида бора в машиностроении: учеб. пособие / А.П. Гаршин, Т.М. Связкина, С.М. Федотова, А.С. Вольфсон, Н.А. Молчанов; под общ. ред. проф. А.П. Гаршина. СПб.: Политех-Пресс, 2020. 311 с.
2. Шабалин Д.Н., Никитков Н.В., Ковеленов Н.Ю. Математическое моделирование в машиностроении: учеб. пособие. СПб.: Политех-Пресс, 2020. 218 с.
3. Табенкин А.Н., Тарасов С.Б., Степанов С.Н. Текстура поверхности и её измерения. Шероховатость, волнистость, профиль, топография / под ред. канд. техн. наук Н.А. Табачниковой. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. 265 с.
4. Никитков Н.В. Решение проблемы изготовления высококачественных плоскостных деталей из конструкционной керамики: дис. ... д-ра техн. наук. Ленинград, 1984.
5. Технические измерения в машиностроительном производстве. Лабораторный практикум: учеб. пособие / И.И. Козарь Т.А. Ларионова, С.А. Любомудров и др. СПб.: Политех-Пресс, 2024. 178 с.
6. Кремень З.И., Юрьев В.Г., Бабошкин А.Ф. Технология шлифования в машиностроении. СПб.: Политех-Пресс, 2022. 188 с.
7. Филимонов Л.Н. Плоское шлифование / под ред. В.И. Муцянка. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. 109 с.
8. Наерман М.С. Справочник молодого шлифовщика. М.: Высшая школа, 1985. 207 с.
9. Кашук В.А., Верещагин А.Б. Справочник шлифовщика. М.: Машиностроение, 1988. 480 с.

10. Орлов П.Н. Технологическое обеспечение качества деталей методами доводки. М.: Машиностроение, 1988. 384 с.

References

1. Garshin A.P., Svyazkina T.M., Fedotova S.M., Volfson A.S., Molchanov N.A. *Shlifovalnye i rezhushchie instrumenty na osnove almaza i nitrída bora v mashinostroenii: ucheb. posobie* [Diamond and boron nitride based grinding and cutting tools in mechanical engineering: Textbook]. Saint Petersburg: Politekh-Press, 2020, 311 p. (In Russ.)
2. Shabalin D.N., Nikitkov N.V., Kovelonov N.Yu. *Matematicheskoe modelirovanie v mashinostroenii: ucheb. posobie* [Mathematical modeling in mechanical engineering: Textbook]. Saint Petersburg: Politekh-Press, 2020, 218 p. (In Russ.)
3. Tabenkin A.N., Tarasov S.B., Stepanov S.N. *Tekstura poverkhnosti i ee izmereniya. Sherokhovatost, volnistost, profil, topografiya* [Surface texture and its measurement. Roughness, waviness, profile, topography]. Saint Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University, 2018, 265 p. (In Russ.)
4. Nikitkov N.V. *Reshenie problemy izgotovleniya vysokokachestvennykh ploskostnykh detalei iz konstruksionnoi keramiki* [Solving the problem of manufacturing high-quality flat parts from structural ceramics. Doctoral dissertation]. Leningrad, 1984.
5. Kozar I.I., Larionova T.A., Lyubomudrov S.A., et al. *Tekhnicheskie izmereniya v mashinostroitel'nom proizvodstve. Laboratornyi praktikum: ucheb. posobie* [Technical measurements in mechanical engineering production. Laboratory workshop: Textbook]. Saint Petersburg: Politekh-Press, 2024, 178 p. (In Russ.)
6. Kremen Z.I., Yurev V.G., Baboshkin A.F. *Tekhnologiya shlifovaniya v mashinostroenii* [Grinding technology in mechanical engineering]. Saint Petersburg: Politekh-Press, 2022, 188 p. (In Russ.)
7. Filimonov L.N. *Ploskoe shlifovanie* [Surface grinding]. 3rd ed., revised and supplemented. Edited by V.I. Mutsyanko. Leningrad: Mashinostroenie, Leningrad Branch, 1985, 109 p. (In Russ.)
8. Naerman M.S. *Spravochnik mladogo shlifovshchika* [Young grinder's handbook]. Moscow: Vysshaya shkola, 1985, 207 p. (In Russ.)
9. Kashchuk V.A., Vereshchagin A.B. *Spravochnik shlifovshchika* [Grinder's handbook]. Moscow: Mashinostroenie, 1988, 480 p. (In Russ.)
10. Orlov P.N. *Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva detalei metodami dovodki* [Technological quality assurance of parts by finishing methods]. Moscow: Mashinostroenie, 1988, 384 p. (In Russ.)

Поступила 02.03.2026; принята к публикации 01.09.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 02/03/2026; revised 01/09/2026; published 30/09/2026

Колодяжный Дмитрий Юрьевич – доктор технических наук, проректор по научной деятельности, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия.
Email: kolod@mail.ru

Шабалин Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент Высшей школы машиностроения, Институт машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.
Email: shadmit@yandex.ru

Ларионов Евгений Олегович – старший преподаватель Высшей школы машиностроения, Институт машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.
Email: beg3mot91@gmail.com

Козарь Иван Иванович – кандидат технических наук, доцент Высшей школы машиностроения, Институт машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.
Email: kii49@yandex.ru

Dmitry O. Kolodyazhnyi – DrSc (Eng.), Vice-Rector for Research, Moscow State University of Technology “STANKIN”, Moscow, Russia.
Email: kolod@mail.ru

Dmitry N. Shabalin – PhD (Eng.), Associate Professor of the Higher School of Mechanical Engineering, Institute of Mechanical Engineering, Materials, and Transport, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia.
Email: shadmit@yandex.ru

Evgeny O. Larionov – Senior Lecturer of the Higher School of Mechanical Engineering, Institute of Mechanical Engineering, Materials, and Transport, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia.
Email: beg3mot91@gmail.com

Ivan I. Kozar – PhD (Eng.), Associate Professor of the Higher School of Mechanical Engineering, Institute of Mechanical Engineering, Materials, and Transport, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia.
Email: kii49@yandex.ru

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 620.93
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-171-179



ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫРАВНИВАНИЯ ПЛОТНОСТИ В ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ ВЯЗКИХ СЖИМАЕМЫХ ТЕПЛОПРОВОДНЫХ ГАЗОВ

Тукмаков А.Л.¹, Тукмаков Д.А.¹, Ахунов А.А.²

¹Институт механики и машиностроения Казанского научного центра Российской академии наук, Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Течения многокомпонентных газовых смесей встречаются в различных промышленных технологиях. В связи с этим возникает задача исследования динамических процессов в многокомпонентных газовых смесях. Исследуются как технологии разделения газовых смесей, так и течения гомогенных смесей газов в различных промышленных аппаратах. **Цель работы.** Целью работы является как исследование процесса выравнивания плотности смеси с начальным неравномерным распределением компонентов газовой смеси. **Используемые методы.** Для описания данного процесса существует несколько подходов, в данной работе применен подход, основанный на решении полной гидродинамической системы уравнений движения. Применяется диффузионное приближение динамики неоднородных сред, описывающее течение вязкой, сжимаемой и теплопроводной среды с учетом двухкомпонентного состава и взаимной диффузии компонентов. Для каждого из компонентов смеси решалось уравнение неразрывности с учетом взаимной диффузии компонентов. Система уравнений интегрировалась явным конечно-разностным методом второго порядка точности со схемой расщепления по пространственным направлениям. Для подавления численных осцилляций применялась схема нелинейной коррекции численного решения. **Новизна.** В математической модели учитывалась двухмерная геометрия, вязкость, сжимаемость и теплопроводность смеси, а также диффузия компонентов смеси. **Результат.** В работе получены результаты, демонстрирующие транспортные свойства численной схемы. Также выявлено, что процесс выравнивания средней плотности смеси сопровождается колебательным процессом плотности смеси. Предоставлены временные зависимости общей плотности смеси в различных точках расчетной области и двухмерные графики распределения параметров смеси. **Практическая значимость.** Практической значимостью было выявление свойств численной модели для исследования динамических процессов в гомогенных газовых смесях.

Ключевые слова:

Работа выполнялась в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра Казанского научного центра Российской академии наук.

© Тукмаков А.Л., Тукмаков Д.А., Ахунов А.А., 2026

Для цитирования

Тукмаков А.Л., Тукмаков Д.А., Ахунов А.А. Численное моделирование выравнивания плотности в двухкомпонентной газовой смеси вязких сжимаемых теплопроводных газов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 171-179. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-171-179>



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

NUMERICAL SIMULATION OF DENSITY EQUALIZATION IN A TWO-COMPONENT GAS MIXTURE OF VISCOUS, COMPRESSIBLE, HEAT-CONDUCTING GASES

Tukmakov A.L.¹, Tukmakov D.A.¹, Akhunov A.A.²

¹Institute of Mechanics and Engineering, Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia

²Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Multicomponent gas mixture flows occur in various industrial processes. Therefore, studying dynamic processes in multicomponent gas mixtures is an important research task. Both gas mixture separation technologies and flows of homogeneous gas mixtures in various industrial units are investigated. **Objectives.** The aim of this work is to investigate the density equalization process in a mixture with an initially nonuniform distribution of gas mixture components. **Methods Applied.** Several approaches can be used to describe this process. In this study, an approach based on solving the complete hydrodynamic system of governing equations is employed. A diffusion approximation for the dynamics of heterogeneous media is used to describe the flow of a viscous, compressible, heat-conducting medium, taking into account its two-component composition and mutual diffusion of the components. For each component of the mixture, the continuity equation has been solved with allowance for mutual diffusion between the components. The system of equations has been integrated using an explicit second-order finite-difference method with a splitting scheme in the spatial directions. A nonlinear correction scheme for the numerical solution has been employed to suppress numerical oscillations. **Originality.** The mathematical model takes into account two-dimensional geometry, viscosity, compressibility, and thermal conductivity of the mixture, as well as diffusion of the mixture components. **Results.** The results obtained demonstrate the transport properties of the numerical scheme. It has also been found that the equalization of the mean mixture density is accompanied by density oscillations. Time histories of the total mixture density at various points in the computational domain and two-dimensional plots of the mixture parameter distributions are presented. **Practical Relevance.** The practical significance of the study lies in identifying the properties of the numerical model relevant to the investigation of dynamic processes in homogeneous gas mixtures.

Keywords: homogeneous mixtures, Navier-Stokes equation, numerical modeling, finite difference methods

The work was carried out as part of the state assignment of the Federal Research Center of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.

For citation

Tukmakov A.L., Tukmakov D.A., Akhunov A.A. Numerical Simulation of Density Equalization in a Two-Component Gas Mixture of Viscous, Compressible, Heat-Conducting Gases. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 171-179. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-171-179>

Введение

Одной из задач механики жидкости и газа является разработка математических моделей технологических процессов. В ряде случаев возникает необходимость исследования течений сред, представляющих собой смесь, состоящую из нескольких компонентов, в частности гомогенные смеси газов, исследованию таких течений посвящены работы [1-18]. В работе [1] моделируется смешивание газов в прямоугольных смесителях, работающих при различных числах Кнудсена и имеющих различные значения коэффициента аккомодации стенки, используется метод Монте-Карло. В статье [2] исследуется гидродинамическая неустойчивость в многокомпонентных газовых смесях, приводящая к появлению конвективных течений. В ходе исследования получены и проанализированы распределения компонентов смеси. Показано влияние исходного состава на режим течения смеси, выявлены условия, при которых молекулярная диффузия форми-

рует конвективные течения. В публикации [3] рассматриваются теоретические вопросы технологических процессов ядерной энергетики. С помощью пакетов вычислительной гидродинамики моделируются течения многокомпонентных газов и газоконденсатных смесей, формируемых в активной зоне ядерного реактора.

В исследовании [4] с помощью пакета вычислительной гидродинамики моделируются процессы конвективных течений и теплопередачи в смесях гелия и ксенона. В работе [5] исследовались особенности конвективного режима, возникшего за счет неустойчивости механического равновесия тройной газовой смеси гелий-аргон-азот при изотермической диффузии. Рассматривается влияние угла наклона диффузионного канала на интенсивность конвективных течений. В публикации [6] исследовалась конвективная неустойчивость в газовых смесях, формируемая за счет различия в коэффициентах диффузии компонентов смеси.

Показано, что в многокомпонентных системах, где проявляются особые диффузионные режимы, возможно возникновение немонотонных распределений. В [7] исследованы свойства вязкости, диффузии и термодиффузии газовых смесей. По методике авторов статьи, основанной на вязкости чистых газов, посчитаны термодиффузионные параметры смеси нескольких газов. В статье [8] исследован массоперенос газов через мембраны. Изучается влияние давления и температуры на коэффициенты сорбции и диффузии. Определено влияние давления и состава газовой смеси на проницаемость и селективность разделения на конкретных газовых смесях. В публикации [9] рассматриваются проблемы применения абсорбционных методов очистки газовых смесей от сернистых газов в технологиях черной металлургии.

В работе [10] разработаны подходы к формализации задачи создания ресурсосберегающих циклических установок адсорбционного разделения и очистки газовых смесей, разработан экономичный алгоритм ее решения. В статье [11] математически моделировался процесс двумерной детонации в горючей смеси в цилиндрическом канале с использованием системы уравнений газовой динамики и химической кинетики. Процесс инициирования детонации рассматривался применительно к стехиометрической водородно-воздушной смеси, находящейся при различных начальных давлениях. В работе [12] разработана квазигидродинамическая система уравнений гомогенной (с общими скоростью и температурой) многокомпонентной газовой смеси в отсутствие химических реакций с общей скоростью. В публикации [13] исследовалось влияние давления газовой смеси на фазовый состав, морфологические особенности поверхности, структурные характеристики и физико-механические свойства пленок на основе соединений алюминия с титаном и азотом, формируемых методом импульсного магнетронного распыления.

В статье [14] представлен численный алгоритм для моделирования течений нереагирующих газовых смесей в трансзвуковых режимах. Алгоритм основан на методе конечного объема, записанного для регуляризованных, или квазигазодинамических, уравнений. Уравнения для описания течения смеси выведены феноменологически на базе существующей регуляризованной системы для однокомпонентного газа и классических уравнений для газовой смеси. В работе [15] проведено исследование лазерной конверсии метановых смесей при различных условиях проведения вычислительного эксперимента. Динамика смесей описывается жесткой системой из уравнений Навье-Стокса и химической кинетики. В статье [16] исследованы процессы газодинамики, теплообмена, в особенности радиационного теплообмена, протекающих в установках вакуумного дегидрирования углеводородного сырья для многоатомных газов. Рассмотрена математическая модель процессов газодинамики, теплообмена, в особенности радиационного теплообмена. В публикации [17] численно моделировалось течение многокомпонентных газовых смесей в

рамках расширенной системы уравнений динамики невязкой среды с помощью модифицированной явной схемы типа Годунова. Особенностью используемого алгоритма является учет возможности появления сильных скачков в решениях, что выражается в использовании точных решений соответствующей задачи Римана. В монографии [18] в одномерном невязком приближении численно исследован процесс взаимодействия ударной волны, движущейся из одного газа в дисперсную взвесь, взвешенную в другом газе, при этом математическая модель не учитывала процессов диффузии.

Обзор литературы демонстрирует, что разработка математических моделей динамики газовых смесей актуальна в связи с различными практическими приложениями. При этом в ряде случаев пренебрегается моделированием газодинамических процессов [2, 5-7, 10] либо таким физическим параметром, как вязкость и теплопроводность компонентов смеси [14], или двухмерной геометрией течения [16].

В данной работе для верификации численного метода при описании конвективно-диффузионных процессов была решена задача о переходе газовой смеси в равновесное состояние при начальном неравномерном распределении одного из компонентов. Рассматривался процесс диффузии метана – одного из наиболее применяемых в энергетике газов и метантиола – одной из наиболее распространенных одоризационных примесей. Новизна работы заключается в том, что математическая модель реализует диффузионный подход газовой динамики неоднородных сред [19] с учетом вязкости, сжимаемости и теплопроводности смеси, а также взаимнообратной диффузии компонент смеси.

Материалы и методы исследования

Модель процесса, применяемая в данной работе, основывается на системе уравнений движения вязкого сжимаемого теплопроводного двухкомпонентного газа, учитывающей диффузию компонентов. В работах [20-24] применялись математические модели динамики двухкомпонентного газа без учета диффузии компонентов. В статье [20] проведено сопоставление физических экспериментов с результатами численных расчетов, в публикации [23] проведено сопоставление результатов численных расчетов с аналитическими расчетами.

Система уравнений динамики двухкомпонентной среды имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1 u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_1 v)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{12} \frac{\partial \rho_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{12} \frac{\partial \rho_1}{\partial y} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_2 v)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{12} \frac{\partial \rho_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{12} \frac{\partial \rho_2}{\partial y} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u^2 + p - \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho u v - \tau_{xy}) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv - \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2 + p - \tau_{yy}) = 0, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(e)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(e + p - \tau_{xx})u - \tau_{xy}v + \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[(e + p - \tau_{yy})v - \tau_{xy}u + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right] = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

$$p = \rho_1 R_1 T + \rho_2 R_2 T, \quad e = \rho_1 C_{v1} T + \rho_2 C_{v2} T + 0,5 \rho (u^2 + v^2), \quad (6)$$

$$\mu = \frac{\rho_1}{\rho} \mu_1 + \frac{\rho_2}{\rho} \mu_2, \quad \lambda = \frac{\rho_1}{\rho} \lambda_1 + \frac{\rho_2}{\rho} \lambda_2.$$

$$\tau_{xx} = (\mu + \mu_T) \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} D \right),$$

$$\tau_{yy} = (\mu + \mu_T) \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} D \right),$$

$$\tau_{xy} = (\mu + \mu_T) \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}. \quad (7)$$

Здесь $R_1, \rho_1, T_1, C_{v1}, R_2, \rho_2, T_2, C_{v2}$ – газосые постоянные, плотности, температуры и удельные теплоемкости газов-компонентов; $\rho = \rho_1 + \rho_2$ – плотность газовой смеси; D_{12} – коэффициент взаимной диффузии газов:

$$D_{12} = \frac{n_1 D_1 + n_2 D_2}{n_1 + n_2}, \quad (8)$$

где n_1, D_1, n_2, D_2 – концентрации и коэффициенты диффузии газа-одоранта и природного газа $D_1 = (\mu_1 + \mu_t)/\rho_1$, $D_2 = (\mu_2 + \mu_t)/\rho_2$; μ_2, μ_t – молекулярная и турбулентная динамическая вязкость компонента с наибольшей концентрацией.

Система уравнений (1)-(6) интегрировалась явным конечно-разностным методом Мак-Кормака второго порядка точности. Рассмотрим применение численного алгоритма на примере скалярного нелинейного уравнения в частных производных:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial a(f)}{\partial x} + \frac{\partial a(f)}{\partial y} = c(f). \quad (9)$$

Алгоритм явного конечно-разностного метода Мак-Кормака [25] для скалярного нелинейного уравнения (9) имеет вид

$$f_{jk}^* = f_{jk}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (a_{j+1k}^n - a_{jk}^n) - \frac{\Delta t}{\Delta y} (b_{jk+1}^n - b_{jk}^n) + \Delta t c_{jk}^n; \quad (10)$$

$$f_{jk}^{n+1} = 0,5 \left[\left(f_{jk}^n + f_{jk}^* \right) - \frac{\Delta t}{\Delta x} (a_{jk}^* - a_{j-1k}^*) - \frac{\Delta t}{\Delta y} (b_{jk}^* - b_{jk-1}^*) + \Delta t c_{jk}^* \right], \quad (11)$$

где $\Delta x, \Delta y$ – шаги по пространственному направлению; Δt – шаг по времени.

В расчетах применялась схема расщепления по пространственным переменным, состоящая из одномерных операторов P_x, P_y , позволяющая построить решение на следующем временном слое [26]:

$$f_{j,k}^{n+1} = P_x \left(\frac{\Delta t_x}{2} \right) P_y \left(\frac{\Delta t_y}{2} \right) P_y \left(\frac{\Delta t_y}{2} \right) P_x \left(\frac{\Delta t_x}{2} \right) f_{j,k}^n. \quad (12)$$

Временные шаги $\Delta t_x = \Delta t_y = \Delta t$. Переход со слоя t^n на слой t^{n+1} осуществляется следующим образом [27]:

$$f_{j,k}^{(1)} = P_x \left(\frac{\Delta t_x}{2} \right) f_{j,k}^n, \quad f_{j,k}^{(2)} = P_y \left(\frac{\Delta t_y}{2} \right) f_{j,k}^{(1)},$$

$$f_{j,k}^{(3)} = P_y \left(\frac{\Delta t_y}{2} \right) f_{j,k}^{(2)}, \quad f_{j,k}^{n+1} = P_x \left(\frac{\Delta t_x}{2} \right) f_{j,k}^{(3)}.$$

В явном методе Мак-Кормака в качестве условия устойчивости рассматривается условие устойчивости типа Куранта-Фридрихса-Леви [25]:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta h^2}{4\nu + (|u| + |v|)\Delta h}, \quad \Delta h = \min(\Delta x, \Delta y),$$

$$|u| = \max |u_i|, |v| = \max |v_i|.$$

Численные осцилляции преодолевались с помощью схемы нелинейной коррекции сеточной функции [27]: если $(\delta \tilde{u}_{j-1/2} \cdot \delta \tilde{u}_{j+1/2}) < 0$ или $(\delta \tilde{u}_{j+1/2} \cdot \delta \tilde{u}_{j+3/2}) < 0$,

$f_j = \tilde{f}_j + k(\delta u_{j+1/2} - \delta u_{j-1/2})$. Используются обозначения:

$$\delta \tilde{u}_{j-1/2} = \tilde{u}_j - \tilde{u}_{j-1}, \quad \delta \tilde{u}_{j+1/2} = \tilde{u}_{j+1} - \tilde{u}_j,$$

$\delta \tilde{u}_{j+3/2} = \tilde{u}_{j+2} - \tilde{u}_{j+1}$, где $\tilde{u}_j$ – значение функции после

перехода на $(n+1)$ -й временной слой по схеме Мак-Кормака, коэффициент коррекции $k = 0,125$.

В продольном направлении количество узлов расчетной области $N_x = 100$, в поперечном направлении количество узлов $N_y = 100$. Для пространственных составляющих скорости на границах задавались однородные граничные условия Дирихле, для всех остальных функций везде задавались однородные граничные условия Неймана.

Полученные результаты и их обсуждение

На рис. 1–6 представлены результаты расчетов процесса изменения плотности одного из компонентов двухкомпонентной газовой смеси при начальном неравномерном распределении его плотности в расчетной области, представляющей собой единичный квадрат ($0 < x < 1, 0 < y < 1$) (см. рис. 1).

Пусть в начальный момент времени задано неравновесное распределение плотности неподвижной газовой смеси, содержащей два газовых компонента при температуре 240 К. Первый компонент –

метантиол, теплоемкости которого $C_p=750$ Дж/кг·К, $C_v=577$ Дж/кг·К, $R=173$ Дж/кг·К, постоянная адиабаты $\gamma=1,3$. Второй компонент – метан, теплоемкости которого $C_p=2260$ Дж/кг·К, $C_v=1742$ Дж/кг·К, $R=518$ Дж/кг·К, постоянная адиабаты $\gamma=1,3$. В начальный момент времени плотность компонента 1 – метантиола – распределена по линейному закону вдоль переменной x и меняется от $\rho_1=0$ при $x=0$ до $\rho_1=2$ кг/м³ при $x=1$ (см. рис. 2).

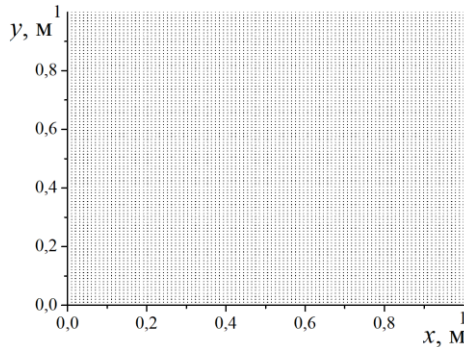


Рис. 1. Сеточное разбиение расчетной области
Fig. 1. Grid partitioning of the computational domain

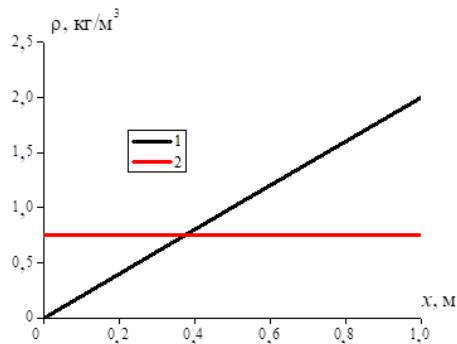


Рис. 2. Начальное пространственное распределение плотности метантиола и метана в продольном направлении – линии 1 и 2 соответственно
Fig. 2. Initial spatial distribution of methanethiol and methane densities in the longitudinal direction, curves 1 and 2, respectively

От переменной y в начальный момент времени газодинамические параметры метантиола не зависят. Начальная плотность второго компонента – метана – во всей расчетной области постоянна и равна $0,75$ кг/м³. Вследствие того, что в начальный момент времени система выведена из состояния равновесия, при $t>0$ начинается переход системы в равновесное состояние. В равновесном состоянии плотность газовой смеси должна быть равна средней по пространству в начальный момент времени: $\rho_{cp}=1,75$ кг/м³. Равновесная плотность метантиола должна в этом случае составлять 1 кг/м³.

На рис. 3 показана зависимость плотности метантиола от времени при $t>0$ в точках с координатами $x=0,01$ м, $x=0,2$ м, $x=0,8$ м, $x=0,99$ м. К моменту времени $t\approx 0,3$ с система переходит в равновесное состояние с

плотностью метантиола $\rho_1=1$ кг/м³. Процесс перехода системы в равновесное состояние включает в себя две стадии. На первой конвективной стадии выравнивание плотности происходит преимущественно за счет колебаний газа вдоль оси $0x$. Колебания происходят с частотой $\nu=156$ Гц. Эта частота приблизительно совпадает с первой собственной частотой колебаний [28] смеси вдоль оси $0x$: $\nu_{11}=c/2L=315$ (м/с)/ $2\text{м}=157,5$ Гц. Здесь $c=(\gamma RT)^{1/2}$ – скорость звука смеси, $\gamma=1,3$ – постоянная адиабаты; $R=R_1\rho_{1cp}/(\rho_{1cp}+\rho_{2cp})+R_2\rho_{2cp}/(\rho_{1cp}+\rho_{2cp})$ – газовая постоянная смеси определяется на основе аддитивного осреднения по массе компонентов; $R_1=173$ Дж/кг·К – газовая постоянная метантиола, $R_2=518$ Дж/кг·К – газовая постоянная метана; $\rho_{1cp}=1$ кг/м³ – средняя по площади плотность метантиола; $\rho_{2cp}=0,75$ кг/м³ – средняя по площади плотность метана. При температуре смеси $T=240$ К и газовой постоянной смеси $R=323$ Дж/(кг·К) скорость звука составляет 315 м/с. Первая собственная частота, полученная в численном расчете $\nu_{11}=c/2L=156$ Гц, тогда как по формуле для первой собственной частоты смеси получается $\nu_{11}=157,5$ Гц.

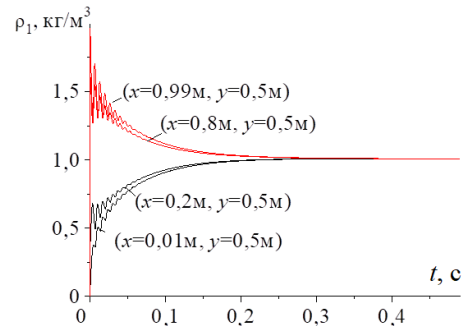


Рис. 3. Процесс выравнивания плотности метантиола в различных точках
Fig. 3. The process of equalizing the density of methanethiol at various points

Конвективная стадия перехода к равновесному состоянию оканчивается при $t\approx 0,08$ с. К этому моменту времени колебания затухают, газ можно считать неподвижным (см. рис. 4).

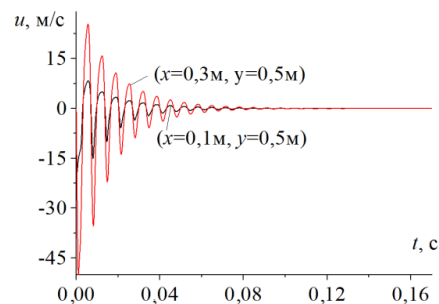


Рис. 4. Колебания скорости газа в процессе перехода к равновесному состоянию в различных точках
Fig. 4. Gas velocity oscillations during the transition to equilibrium at various points

Затем при $t > 0,08$ с начинается диффузионная стадия, оканчивающаяся при $t \approx 0,3$ с установлением равновесного состояния с постоянной плотностью компонентов и с постоянным давлением смеси (см. рис. 5).

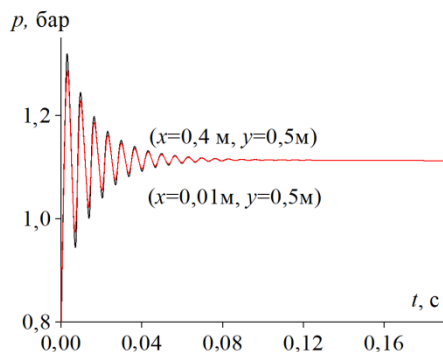


Рис. 5. Процесс установления равновесного давления
Fig. 5. Equilibrium pressure establishment

Пространственные формы колебаний давления, температуры, плотности смеси и ее компонентов в момент времени $t=0,03$ с приведены на рис. 6, а-д. Колебания происходят вдоль оси Ox на первой собственной частоте с узлами скорости при $x=0$ м, $x=1$ м. Соответственно, при $x=0$ м, $x=1$ м располагаются пучности стоячих волн давления, температуры и плотности.

Закключение

Таким образом, расчеты показывают, что процесс установления равновесного состояния при неравновесном начальном распределении плотности одного из компонентов протекает в две стадии – в результате процесса конвекции и последующего процесса диффузии. Конвективная стадия выравнивания плотности проис-

ходит с частотой первого линейного резонанса для смеси равновесного состава. Время ее протекания меньше, чем время протекания диффузионной стадии (см. рис. 4, 5), по окончании которой параметры смеси принимают равновесные значения, равные средним по пространству начальным величинам.

На основе анализа результатов расчетов можно сделать вывод о работоспособности вычислительного метода применительно к описанию конвективно-диффузионных процессов, поскольку обе стадии процесса установления равновесного состояния при начальном неравновесном распределении плотности описываются с высокой точностью. На конвективной стадии достигается высокая точность определения частоты колебаний, что свидетельствует о том, что численная схема обладает хорошими транспортными свойствами, и при моделировании распространения возмущений скорость звука определяется с высокой точностью. Следствием работы схемы на диффузионной стадии является переход к установившимся параметрам, которые также с высокой точностью совпадают с равновесными.

Результаты расчетов могут быть применены при моделировании процессов одоризации газов.

Список источников

1. Sabouri M., Roohi E. Inversion in binary gas mixtures in rarefied flow conditions: Direct simulation Monte Carlo solution and comparison with the analytical solutions at free molecular regime // *Physics of Fluids*. 2023, vol. 35, no. 7.
2. Мухамбетова А., Косов В.Н. Особенности многокомпонентного изотермического смешения газовых смесей на границе «диффузия-конвекция» // *Universum: технические науки*. 2022. № 5-8. С. 27-30.

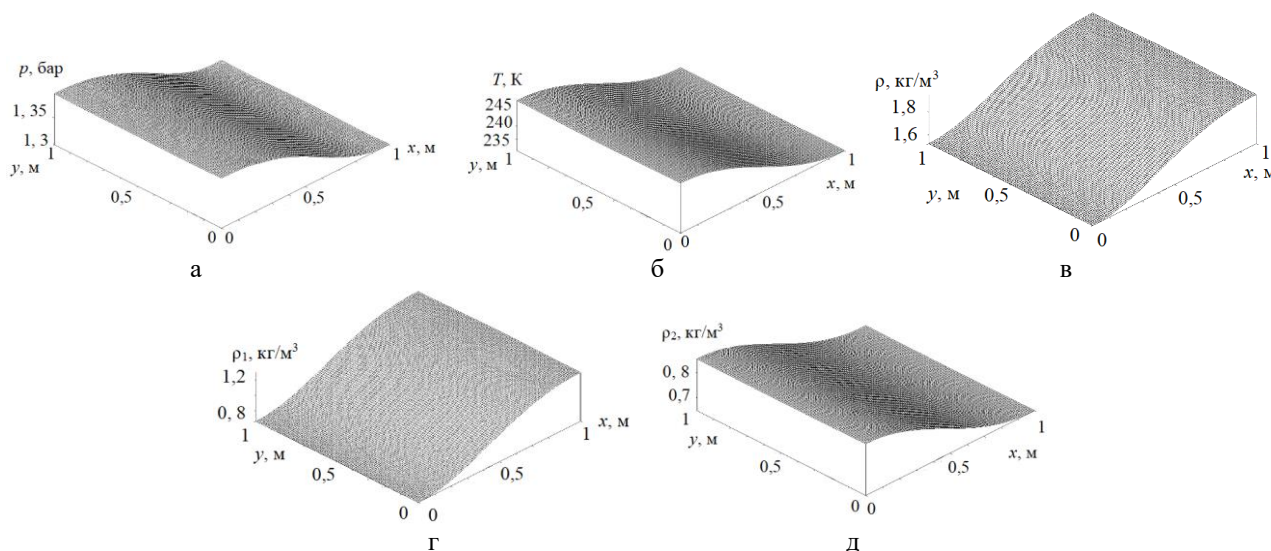


Рис. 6. Поля газодинамических функций двухкомпонентной газовой смеси в момент времени $t=0,03$ с:

а – давление; б – температура; в – плотность смеси; г – плотность метантиола; д – плотность метана

Fig. 6. Fields of gas-dynamic variables of the two-component gas mixture at time $t = 0.03$ s: а is pressure; б is temperature; в is mixture density; г is methanethiol density; д is methane density

3. Bhowmik P.K., Schlegel J.P. Multicomponent gas mixture parametric CFD study of condensation heat transfer in small modular reactor system safety // *Experimental and Computational Multiphase Flow*. 2023, vol. 5, no. 1, pp. 15-28.
4. Zhou B., Sun J., Sun Y. Investigation on Laminar Flow and Heat Transfer of Helium–Xenon Gas Mixtures with Variable Properties // *Energies*. 2023, vol. 16, no. 4
5. Влияние угла наклона канала на конвективное смешение, вызванное неустойчивостью механического равновесия тройной газовой смеси при изотермической диффузии / Асембаева М.К., Косов В.Н., Красиков С.А., Федоренко О.В. // *Письма в Журнал технической физики*. 2019. Т. 45. № 21. С. 7-10.
6. Косов В.Н., Мукамеденкызы В., Федоренко О.В. Некоторые особенности смешения тройных газовых смесей на границе смены режимов «диффузия - концентрационная гравитационная конвекция» в квазистационарных условиях // *Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки*. 2018. № 2. С. 125-133.
7. Расчет термодиффузионных характеристик газов в рамках кинетических теорий разреженные газы / Богатырев А.Ф., Макеенкова О.А., Кучеренко М.А., Григорьев Е.Б. // *Научно-технический сборник «Вести газовой науки»*. 2021. № 4. С. 110-118.
8. Каграманов Г.Г., Гуркин В.Н., Фарносова Е.Н. Влияние растворимости газов на эффективность мембранных процессов, на примере разделения смесей He/CH_4 и CO_2/CH_4 // *Мембраны и мембранные технологии*. 2020. Т. 10. № 4. С. 249-256.
9. Черчинцев В.Д., Савина Ю.Е. Совершенствование абсорбционных процессов улавливания диоксида серы из газов агломерационного производства // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2012. № 1. С. 21-23.
10. Методология создания ресурсосберегающих циклических установок адсорбционного разделения и очистки газовых смесей / Акулинин Е.И., Голубятников О.О., Дворецкий Д.С., Дворецкий С.И. // *Математические методы в технологиях и технике*. 2021. № 1. С. 15-19.
11. Условия инициирования детонации в стехиометрической водородно-воздушной смеси стримерным разрядом / Булат П.В., Волков К.Н., Грачев Л.П., Есаков И.И., Раваев А.А. // *Инженерно-физический журнал*. 2023. Т. 96. № 6. С. 1481-1486.
12. Злотник А.А., Федченко А.С. О свойствах квазигазодинамической системы уравнений гомогенной газовой смеси с общей регуляризующей скоростью // *Дифференциальные уравнения*. 2022. Т. 58. № 3. С. 346-360.
13. Каменева А.Л., Сошина Т.О. Физико-механические свойства пленок на основе Ti-Al-N, формируемых импульсным магнетронным распылением при переменном давлении газовой смеси // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2013. № 4 (44). С. 60-64.
14. Елизарова Т.Г., Шильников Е.В. Численное моделирование газовых смесей в рамках квазигазодинамического подхода на примере взаимодействия ударной волны с пузырьком газа // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2021. Т. 61. № 1. С. 124-135.
15. Пескова Е.Е., Снытников В.Н. Численное исследование конверсии метановых смесей под воздействием лазерного излучения // *Журнал Средневолжского математического общества*. 2023. Т. 25. № 3. С. 159-173.
16. Назаров А.А., Поникаров С.И. Апробация математической модели радиационного теплообмена многоатомных газов в установках вакуумного дегидрирования углеводородов // *Теоретические основы химической технологии*. 2020. Т. 54. № 4. С. 480-495.
17. Борисов В.Е., Рыков Ю.Г. Моделирование течений многокомпонентных газовых смесей с использованием метода двойного потока // *Математическое моделирование*. 2020. Т. 32. № 10. С. 3-20.
18. Кутушев А.Г. Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах. Санкт-Петербург: Недра, 2003. 284 с.
19. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978. 336 с.
20. Нигматулин Р.И., Губайдуллин Д.А., Тукмаков Д.А. Ударно-волновой разлет газовзвесей // *Доклады Академии наук*. 2016. Т. 466. № 4. С. 418-421.
21. Тукмаков Д.А. Численное моделирование движения и отражения ударных волн высокой интенсивности в неоднородной среде // *Физика и техника высоких давлений*. 2019. Т. 29. № 4. С. 18-26.
22. Тукмаков Д.А. Численное исследование влияния свойств газовой составляющей взвеси твердых частиц на разлет сжатого объема газовзвеси в двухкомпонентной среде // *Инженерно-физический журнал*. 2020. Т. 93. № 2. С. 304-310.
23. Тукмаков Д.А. Численное исследование интенсивных ударных волн в запыленных средах с однородной и двухкомпонентной несущей фазой // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2020. Т. 12. № 1. С. 141-154.
24. Тукмаков Д.А. Конечно-разностная модель динамики гомогенной смеси в применении к исследованию распространения и отражения ударной волны большой интенсивности в водородно-воздушной среде // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2020. № 1. С. 86-97.
25. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т. 2. М.: Мир, 1991. 551 с.
26. Ковеня В.М., Тарнавский Г.А., Черный С.Г. Применение метода расщепления в задачах аэродинамики. Новосибирск: Наука, 1990. 247 с.
27. Музафаров И.Ф., Утюжников С.В. Применение компактных разностных схем к исследованию нестационарных течений сжимаемого газа // *Математическое моделирование*. 1993. №3. С.74-83.
28. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984. 403 с.

References

1. Sabouri M., Roohi E. Inversion in binary gas mixtures in rarefied flow conditions: Direct simulation Monte Carlo solution and comparison with the analytical solutions at free molecular regime. *Physics of Fluids*. 2023;35(7).
2. Mukhambetova A., Kosov V.N. Features of multicomponent isothermal mixing of gas mixtures at the diffusion-convection boundary. *Universum: Tekhnicheskie nauki* [Universum: Technical Sciences]. 2022;(5-8):27-30. (In Russ.)

3. Bhowmik P.K., Schlegel J.P. Multicomponent gas mixture parametric CFD study of condensation heat transfer in small modular reactor system safety. *Experimental and Computational Multiphase Flow*. 2023;5(1):15-28.
4. Zhou B., Sun J., Sun Y. Investigation on laminar flow and heat transfer of helium-xenon gas mixtures with variable properties. *Energies*. 2023;16(4).
5. Asembaeva M.K., Kosov V.N., Krasikov S.A., Fedorenko O.V. Effect of channel inclination angle on convective mixing caused by mechanical equilibrium instability of a ternary gas mixture during isothermal diffusion. *Pisma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Technical Physics Letters]. 2019;45(21):7-10. (In Russ.)
6. Kosov V.N., Mukamedenkyzy V., Fedorenko O.V. Some features of mixing of ternary gas mixtures at the boundary of transition between diffusion and concentration-driven gravitational convection regimes under quasi-stationary conditions. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki* [Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Natural Sciences]. 2018;(2):125-133. (In Russ.)
7. Bogatyrev A.F., Makeenkova O.A., Kucherenko M.A., Grigoriev E.B. Calculation of thermodiffusion characteristics of gases within the framework of kinetic theories of rarefied gases. *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Vesti gazovoy nauki* [Scientific and Technical Collection News of Gas Science]. 2021;(4):110-118. (In Russ.)
8. Kagramanov G.G., Gurkin V.N., Famosova E.N. Effect of gas solubility on the efficiency of membrane processes: A case study of He/CH₄ and CO₂/CH₄ mixture separation. *Membrany i membrannye tekhnologii* [Membranes and Membrane Technologies]. 2020;10(4):249-256. (In Russ.)
9. Cherkintsev V.D., Savina Yu.E. Improvement of absorption processes for capturing sulfur dioxide from sintering plant gases. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2012;(1):21-23. (In Russ.)
10. Akulinin E.I., Golubyatnikov O.O., Dvoretzkiy D.S., Dvoretzkiy S.I. Methodology for creating resource-saving cyclic adsorption units for separation and purification of gas mixtures. *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical Methods in Technology and Engineering]. 2021;(1):15-19. (In Russ.)
11. Bulat P.V., Volkov K.N., Grachev L.P., Esakov I.I., Ravaev A.A. Conditions for initiation of detonation in a stoichiometric hydrogen-air mixture by a streamer discharge. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Journal of Engineering Physics]. 2023;96(6):1481-1486. (In Russ.)
12. Zlotnik A.A., Fedchenko A.S. On the properties of a quasi-gasdynamic system of equations for a homogeneous gas mixture with a common regularizing velocity. *Differentsialnye uravneniya* [Differential Equations]. 2022;58(3):346-360. (In Russ.)
13. Kameneva A.L., Soshina T.O. Physical and mechanical properties of Ti-Al-N-based films formed by pulsed magnetron sputtering at variable gas mixture pressure. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013;(44):60-64. (In Russ.)
14. Elizarova T.G., Shilnikov E.V. Numerical simulation of gas mixtures within the quasi-gasdynamic approach: A case study of shock wave interaction with a gas bubble. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki* [Computational Mathematics and Mathematical Physics]. 2021;61(1):124-135. (In Russ.)
15. Peskova E.E., Snytnikov V.N. Numerical study of the conversion of methane mixtures under laser irradiation. *Zhurnal Srednevolzhskogo matematicheskogo obshchestva* [Journal of the Middle Volga Mathematical Society]. 2023;25(3):159-173. (In Russ.)
16. Nazarov A.A., Ponikarov S.I. Testing of a mathematical model of radiative heat transfer in polyatomic gases in vacuum hydrocarbon dehydrogenation units. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering]. 2020;54(4):480-495. (In Russ.)
17. Borisov V.E., Rykov Yu.G. Modeling of multicomponent gas mixture flows using the double-flux method. *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical Modeling]. 2020;32(10):3-20. (In Russ.)
18. Kutushev A.G. *Matematicheskoe modelirovanie volnovykh protsessov v aerodispersnykh i poroshkoobraznykh sredakh* [Mathematical modeling of wave processes in aerodisperse and powder media]. Saint Petersburg: Nedra, 2003, 284 p. (In Russ.)
19. Nigmatulin R.I. *Osnovy mekhaniki geterogennykh sred* [Fundamentals of mechanics of heterogeneous media]. Moscow: Nauka, 1978, 336 p. (In Russ.)
20. Nigmatulin R.I., Gubaydullin D.A., Tukmakov D.A. Shock-wave expansion of gas-particle mixtures. *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences]. 2016;466(4):418-421. (In Russ.)
21. Tukmakov D.A. Numerical simulation of the motion and reflection of high-intensity shock waves in a heterogeneous medium. *Fizika i tekhnika vysokikh davleniy* [Physics and Technology of High Pressures]. 2019;29(4):18-26. (In Russ.)
22. Tukmakov D.A. Numerical study of the effect of gas-phase properties of a solid-particle suspension on the expansion of a compressed volume of a gas-particle mixture in a two-component medium. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Journal of Engineering Physics]. 2020;93(2):304-310. (In Russ.)
23. Tukmakov D.A. Numerical study of intense shock waves in dusty media with homogeneous and two-component carrier phases. *Kompyuternye issledovaniya i modelirovanie* [Computer Research and Modeling]. 2020;12(1):141-154. (In Russ.)
24. Tukmakov D.A. Finite-difference model of homogeneous mixture dynamics applied to the study of propagation and reflection of a high-intensity shock wave in a hydrogen-air medium. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, Systems, Networks in Economics, Technology, Nature and Society]. 2020;(1):86-97. (In Russ.)
25. Fletcher C. *Vychislitel'nye metody v dinamike zhidkostey* [Computational Techniques for Fluid Dynamics]. Moscow: Mir, 1991, 551 p. (In Russ.)
26. Kovenya V.M., Tamavskiy G.A., Chernyy S.G. *Prime-nenie metoda rasshchepeniya v zadachakh aerodinamiki* [Application of the splitting method to problems of aerodynamics]. Novosibirsk: Nauka, 1990, 247 p. (In Russ.)

27. Muzafarov I.F., Utyuzhnikov S.V. Application of compact finite-difference schemes to the study of unsteady compressible gas flows. *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical Modeling]. 1993;(3):74-83. (In Russ.)
28. Krasilnikov V.A., Krylov V.V. *Vvedenie v fizicheskuyu akustiku* [Introduction to physical acoustics]. Moscow: Nauka, 1984, 403 p. (In Russ.)

Поступила 29.12.2025; принята к публикации 04.09.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 29/12/2025; revised 04/09/2026; published 30/09/2026

Тукмаков Алексей Львович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт механики и машиностроения Казанского научного центра Российской академии наук, Казань, Россия.
Email: altukmakov@kai.ru

Тукмаков Дмитрий Алексеевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт механики и машиностроения Казанского научного центра Российской академии наук, Казань, Россия.
Email: tukmakovda@imm.knc.ru. ORCID 0000-0002-0335-8548

Ахунов Адель Айратович – научный сотрудник, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия.
Email: white-bars95@yandex.ru

Alexey L. Tukmakov – DrSc (Eng.), Leading Researcher, IME Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia.
Email: altukmakov@kai.ru

Dmitry A. Tukmakov – PhD (Eng.), Senior Researcher, IME Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia.
Email: tukmakovda@imm.knc.ru. ORCID 0000-0002-0335-8548

Adel A. Akhunov – Researcher, Kazan National Research Technical University, Kazan, Russia.
Email: white-bars95@yandex.ru

ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

METALLURGICAL POWER ENGINEERING, ENERGY SAVING AND ELECTRICAL SYSTEMS

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

УДК 621.316.925.1

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-180-187



МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ СЕКЦИЙ ШИН 110 КВ НА БАЗЕ МИКРОПРОЦЕССОРНОГО УСТРОЙСТВА

Трофимова С.Н.¹, Сергеев Ю.С.¹, Платов С.И.², Толмачев Е.В.¹, Резников И.М.¹¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Актуальность работы. Решение задач обеспечения надежного электроснабжения производственного процесса невозможно без бесперебойной работы элементов энергосистемы. Современная тенденция к увеличению потребления мощности электросетевого комплекса металлургического предприятия увеличивает вероятность повышения токов короткого замыкания, что, в свою очередь, приводит к неселективной работе дифференциальной защиты сборных шин. В настоящий момент для выполнения поставленных задач наблюдается тенденция применения микропроцессорных устройств при модернизации комплексов релейной защиты и автоматики, так, например, строятся цифровые подстанции, используются новые типы трансформатора тока и т.д. Вместе с тем микропроцессорные устройства выгодны с экономической точки зрения, так как обладают большим высоким коэффициентом готовности и низким временем срабатывания.

Цель работы. Разработка модели логической части дифференциальной защиты шин на базе терминала БЭ2704 производства ООО «НПП „ЭКРА”». **Используемые методы.** При создании математической модели различных режимов работы дифференциальной защиты шин использовалось специализированное отечественное программное обеспечение. Проведен сравнительный анализ с показателями, снятыми с терминала, эксплуатирующегося в работающей энергосистеме для проверки работоспособности и точности алгоритмов дифференциальной защиты. **Новизна.** Применение моделирования работы дифференциальной защиты шин терминалами БЭ2704 в условиях конкретной подстанции для оценки правильности работы защиты при авариях и использовании полученных результатов для настройки терминалов защит, а также для обучения персонала. **Результат.** Разработана и проанализирована модель дифференциальной защиты шин терминала БЭ2704 производства ООО «НПП „ЭКРА”». Подтверждена адекватность модели путем сравнения результатов моделирования с фактическими осциллограммами срабатывания защиты. Определены оптимальные параметры дифференциальной защиты секций шин 110 кВ, обеспечивающие максимальную чувствительность и селективность при минимальном времени срабатывания. **Практическая значимость.** Применение модели позволило проверить схемы подключения, алгоритмы работы и параметры настройки терминала БЭ2704 на подстанции 110/35/6 Таганай, что исключает ошибки при внедрении и настройке оборудования на подстанции и снижает время пусконаладочных работ. Изученные режимы различных алгоритмов работы дифференциальной защиты шин позволили уже на этапе разработки алгоритма выявить принципиальные ошибки и принять меры по их устранению, что позволило сократить временные затраты на реализацию разрабатываемого оборудования.

Ключевые слова: дифференциальная защита секций шин, короткое замыкание, пусковой орган, избирательный орган, математическая модель

© Трофимова С.Н., Сергеев Ю.С., Платов С.И., Толмачев Е.В., Резников И.М., 2026

Для цитирования

Моделирование работы дифференциальной защиты секций шин 110 кВ на базе микропроцессорного устройства / Трофимова С.Н., Сергеев Ю.С., Платов С.И., Толмачев Е.В., Резников И.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 180-187. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-180-187>



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

MODELING THE OPERATION OF 110 kV BUSBAR SECTION DIFFERENTIAL PROTECTION BASED ON A MICROPROCESSOR-BASED DEVICE

Trofimova S.N.¹, Sergeev Yu.S.¹, Platov S.I.², Tolmachev E.V.¹, Reznikov I.M.¹

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Ensuring a reliable power supply for a production process is impossible without the uninterrupted operation of power system components. The current trend toward increasing power consumption in the electrical grid infrastructure of metallurgical enterprises increases the probability of higher short-circuit currents, which, in turn, may lead to non-selective operation of busbar differential protection. At present, there is a growing trend toward the use of microprocessor-based devices in the modernization of relay protection and automation systems. For example, digital substations are being implemented, and new types of current transformers are being introduced. At the same time, microprocessor-based devices are economically advantageous because they offer a high availability factor and short operating time. **Objectives.** The research is aimed at developing a model of the logic part of busbar differential protection based on the BE2704 terminal manufactured by EKRA Research and Production Enterprise LLC. **Methods Applied.** A specialized domestic software package has been used to develop a mathematical model of various operating modes of the busbar differential protection. A comparative analysis has been performed using parameters recorded by a terminal operating in an actual power system to verify the functionality and accuracy of the differential protection algorithms. **Originality.** The novelty of the study lies in modeling the operation of busbar differential protection using BE2704 terminals under the conditions of a specific substation to assess the correctness of protection operation during faults, as well as in using the obtained results to configure protection terminals and train personnel. **Result.** A model of the busbar differential protection of the BE2704 terminal manufactured by EKRA Research and Production Enterprise LLC has been developed and analyzed. The adequacy of the model has been confirmed by comparing the simulation results with actual oscillograms of protection operation. Optimal parameters of the differential protection for the 110 kV busbar sections have been determined, ensuring maximum sensitivity and selectivity with minimum operating time. **Practical Relevance.** The model makes it possible to verify the connection diagrams, operating algorithms, and setting parameters of the BE2704 terminal at the 110/35/6 kV Taganay substation. This eliminates errors during the implementation and commissioning of equipment at the substation and reduces commissioning time. Analysis of various operating modes of busbar differential protection algorithms has made it possible to identify fundamental errors at the algorithm development stage and take measures to eliminate them, thereby reducing the time required to implement the equipment under development.

Keywords: busbar section differential protection, short circuit, starting element, selective element, mathematical mode

For citation

Trofimova S.N., Sergeev Yu.S., Platov S.I., Tolmachev E.V., Reznikov I.M. Modeling the Operation of 110 kV Busbar Section Differential Protection Based on a Microprocessor-Based Device. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 180-187. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-180-187>

Введение

Непрерывность производственного процесса крупного металлургического предприятия – одна из важнейших задач электросетевого комплекса, которая достигается за счет осуществления безаварийного режима работы системы электроснабжения [1-5]. Технологический процесс промышленного предприятия в своей основе зависит от качества электроснабжения, которое определяется показателями его надежности и экономической эффективности. Даже кратковременная остановка электроснабжения может стать иницирующим фактором для остановки сложного технологического процесса, приводящим, в

свою очередь, к значительному экономическому ущербу. Надежность системы электроснабжения [6-8] напрямую зависит от технического состояния оборудования [9], устройств релейной защиты и автоматики (РЗА), в том числе от их физического и морального износа [10].

Растущий спрос на потребление электроэнергии в различных отраслях народного хозяйства обуславливает необходимость обеспечения надежного и стабильного электроснабжения для поддержания устойчивости и эффективности функционирования экономического комплекса [11]. Задача обеспечения бесперебойности электроснабжения промышленных потребителей решается разными способами, в том числе

применением методов машинного обучения [12, 13]. Пропорционально развитию электроэнергетических систем возрастают требования к их системам защит. Развитие систем РЗА невозможно без решения задач повышения требований надежности и показателей технического совершенства – быстродействия, селективности и чувствительности [14], что позволяет эффективно выявлять дефекты оборудования на ранних стадиях, минимизировать риск аварийных ситуаций и оптимизировать эксплуатацию энергетических объектов. На сегодняшний день большинство РЗА в России представляют собой электромеханические устройства, многие из которых эксплуатируются более 25 лет [3, 12], что превышает нормативный срок службы, создавая не только риски снижения надежности энергосистемы, а значит, требует модернизации парка оборудования для повышения их надежности и безопасности.

В настоящее время имеет место устойчивая практика применения микропроцессорных (МП) устройств при модернизации комплексов РЗА [15], что обусловлено их высокой надежностью, гибкостью настройки, способностью интегрироваться в современные системы мониторинга и управления энергосистемами. МП-устройства релейной защиты (РЗ) являются пятым поколением устройств РЗ [16] и обеспечивают повышенную точность измерений, возможность реализации сложных алгоритмов защиты и автоматики, а также снижение эксплуатационных затрат за счет меньшей потребности в техническом обслуживании по сравнению с устаревшими электромеханическими аналогами. Достоинства МП-устройств: самодиагностика, совмещение функций, ускорение отключения короткого замыкания, обеспечивающие безопасность, создают преимущества перед электромеханическими (ЭМ) реле [17]. Однако широкому внедрению таких устройств препятствуют высокие первоначальные затраты, недостаток квалифицированного персонала и необходимость адаптации существующей инфраструктуры. Этим обозначается острейшая проблема российской энергетики – поддержание работоспособного состояния действующих систем защиты, а также внедрение современных систем релейной защиты и автоматики [3]. Поэтому реконструкция систем РЗА является стратегически важным шагом для обеспечения надежности энергоснабжения и оптимизации эксплуатационных процессов. Система мониторинга позволяет перейти от традиционного планового обслуживания к обслуживанию по состоянию, снижая затраты и предотвращая аварии [18].

Отказ хотя бы одной МП-защиты приводит к более тяжелым последствиям для субъекта народного хозяйства, чем неисправность электромагнитных защит, потому что МП-устройство защиты выполняет больше задач, чем электромагнитные защиты [4, 8]. Также отказ опасен еще и тем, что снижает запас динамической устойчивости электроэнергетической

системы (ЭЭС) и уровень надежности электроснабжения потребителей [6]. Сравнительный анализ алгоритмов дифференциальной защиты, оценка их эффективности и устойчивости к различным видам повреждений и режимам работы энергосистемы [19, 20] и моделирование процессов дифференциальной защиты шин дают возможность не только изучить режимы работы объектов энергетики, проверить устройства режимной и противоаварийной автоматики, но и получить основу для разработки и проверки алгоритмов действия устройств защиты, регулирования и управления процессами, происходящими в энергосистеме как в период безаварийной работы, так и в момент аварии. Решение вопросов обеспечения точности срабатывания защиты, времени реакции, устойчивости к внешним воздействиям и совместимости с существующими системами автоматизации даёт возможность проводить контроль и оценку рисков при внедрении нового оборудования в рассматриваемой энергосистеме, а также разработать рекомендации по оптимизации настройки и выбора наиболее подходящего алгоритма для конкретных условий эксплуатации.

Материалы и методы исследования

Микропроцессорные устройства РЗ различного назначения имеют много общего, а их структурные схемы подобны [21], одна из которых представлена на рис. 1.

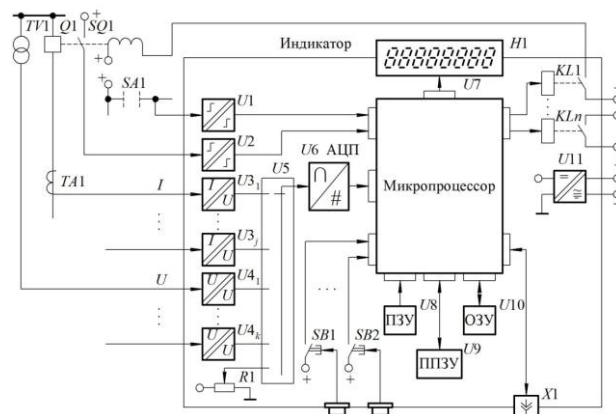


Рис. 1. Структурная схема МП-устройства релейной защиты

Fig. 1. Block diagram of a microprocessor-based relay protection device

Центральным узлом МП-устройства является микропроцессор, который через свои элементы ввода-вывода обменивается информацией с периферийными узлами. С помощью этих дополнительных узлов осуществляется сопряжение микропроцессора с внешней средой: датчиками исходной информации, объектом управления оператором и т.д. [21]. В сложных устройствах РЗ используются от 7 до 10 микропроцессоров, работающих параллельно, каждый из которых решает отдельный фрагмент общей задачи с целью обеспечения высокого быстродействия.

Неотъемлемыми элементами цифрового устройства РЗ являются: входные $U1-U4$ и выходные $KL1-KLj$ преобразователи сигналов, тракт аналого-цифрового преобразования (АЦП) $U6, U7$, кнопки управления и ввода информации от оператора $SB1, SB2$, индикатор (дисплей) H для отображения информации и блок питания $U5$. Также современные МПУстройства оснащаются коммуникационным портом $X1$ для связи с другими устройствами [21].

Процесс преобразования (квантирования) выполняется в канале аналого-цифрового преобразования. Переход от непрерывного сигнала к дискретному всегда происходит с потерей некоторого количества информации. Конечное число градаций дискретного сигнала обуславливает погрешность квантования по уровню, а одной из причин необходимости квантования по времени является то, что и сам процесс аналого-цифрового преобразования, и последующий цикл вычислений в МПУ требуют определенного времени, по истечении которого можно делать выборку входного сигнала. Формирование выборок сигнала представлено на **рис. 2** [21].

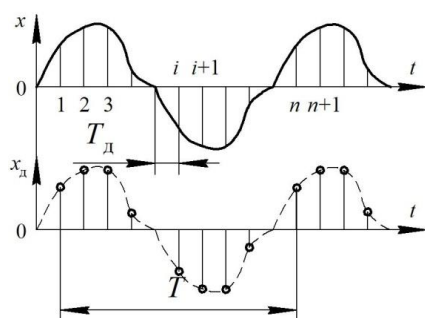


Рис. 2. График формирования выборок сигнала
Fig. 2. Signal sampling formation waveform

Основная сложность осуществления защиты шин заключается в необходимости обеспечения селективности при высоких кратностях токов внешних коротких замыканий (КЗ), обуславливающих существенные погрешности трансформатора тока (ТТ), и, с другой стороны, высокой чувствительности в минимальных режимах при незначительных токах КЗ [22].

Был проведен анализ осциллограмм срабатывания дифференциальной защиты шин (ДЗШ), полученных на модели и сравнение их с осциллограммами, полученными с терминала БЭ2704, эксплуатирующегося на подстанции 110/35/6 Таганай. Это позволило оценить корректность работы модели защиты, выявить возможные отклонения и сопоставить их с реальными условиями эксплуатации. Дифференциальная защита в терминале БЭ2704 выполнена пофазной и содержит пусковые органы, действующие при КЗ на любой из систем шин, а также избирательные органы, определяющие поврежденную систему шин (СШ) [22]. Сигнал на отключение поврежденной системы шин появляется только при срабатывании пускового (ПО) и избирательного (ИО) органов поврежденной фазы.

Осциллограммы процессов срабатывания ДЗШ, отражающие работу защиты первой секции шин, представлены на **рис. 3**. ПО через промежуточные трансформаторы тока подключены к основным ТТ всех присоединений систем шин, за исключением трансформаторов тока шиносоединительного выключателя (ШСВ). ИО с помощью тех же ТТ подключены к основным ТТ присоединений каждой системы шин, включая трансформаторы тока ШСВ [22]. При срабатывании ПО и ИО сигналы отключения действуют на выходные реле, формирующие команды отключения поврежденных систем шин. Отключение поврежденной системы шин производится следующим образом: при возникновении КЗ на первой системе шин (СШ) срабатывают реле ПО $I_d > PO1$ ДЗШ, через выдержку времени и реле ПО $I_d > IO1$ ДЗШ поврежденной фазы. Сигналы с выхода «И» (3), «ИЛИ» (4) подаются на вход «И-НЕ» (5) и при отсутствии сигнала на запрещающем входе «И-НЕ» (5) от устройства контроля исправности токовых цепей и логики опробования, ДЗШ первой секции шин действует на отключение присоединений, зафиксированных за первой системой шин. По приведенной осциллограмме срабатывания ДЗШ первой секции шин (см. **рис. 3**) видно, что в момент возникновения КЗ на линии выключателя $Q09$ срабатывает ИО1, а ПО1 срабатывает с выдержкой времени, равной 0,05 с.

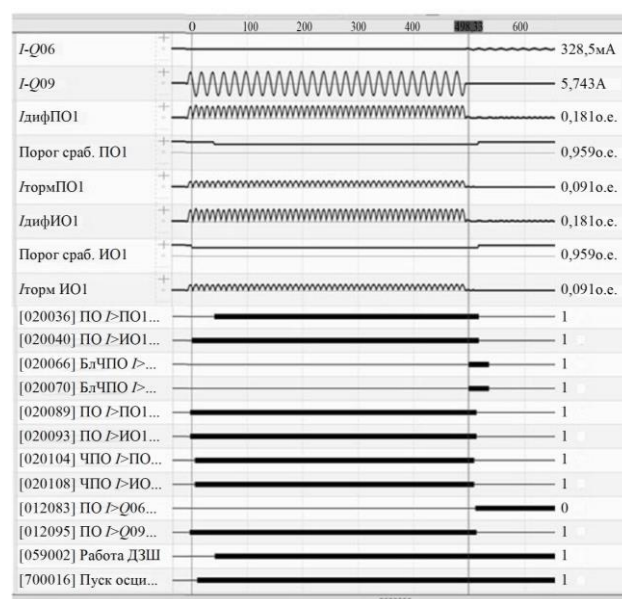


Рис. 3. Осциллограмма срабатывания ДЗШ первой секции шин

Fig. 3. Oscillogram of busbar differential protection operation for the first busbar section

В момент включения ПО1 срабатывает ДЗШ первой секции шин, а в момент срабатывания ИО1 действует запрет АПВ, через 0,001 с срабатывает чувствительный пусковой орган (ЧПО) и запускается осциллограф. Когда КЗ на выключателе $Q09$ устранено, срабатывает блокировка ЧПО. Действия диффе-

рениальной защиты шин с момента возникновения КЗ до момента отключения присоединения с выключателем Q09 заняли 0,5 с. Действия дифференциальной защиты шин для выключателя Q06 аналогичны.

Полученные результаты и их обсуждение

Для решения поставленных задач была разработана модель подстанции 110/35/6 Таганай с дифференциальной защитой шин с использованием отечественного программного комплекса *SimInTech*. В связи с большим объемом модели представим модель только логической части дифференциальной защиты шин терминала БЭ2704 (рис. 4). Эта модель на основе изучения свойств и поведения терминала БЭ2704 дает возможность детально исследовать функциональные характеристики терминала и оценить его работоспособность при различных условиях эксплуатации, поскольку неправильные действия РЗА приводят к большому ущербу для энергосистемы [7, 18, 23]. Модель позволяет проверить функционирование устройства в условиях, приближенных к реальным, проанализировать разные аварийные ситуации, поведение энергосистемы, а также она может использоваться для обучения персонала [7].

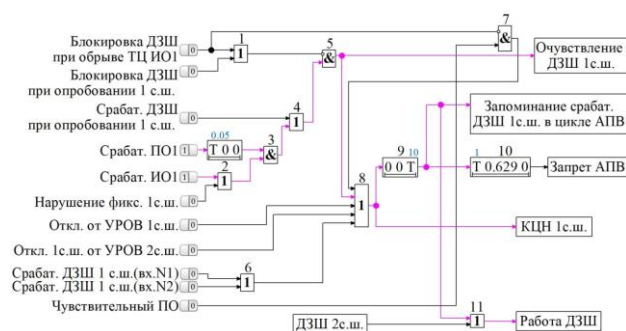


Рис. 4. Модель логической схемы ДЗШ
Fig. 4. Model of the busbar differential protection logic circuit

Результат работы логической схемы ДЗШ – временная диаграмма состояния логических элементов схемы (включение/выключение реле) – представлен на рис. 5.

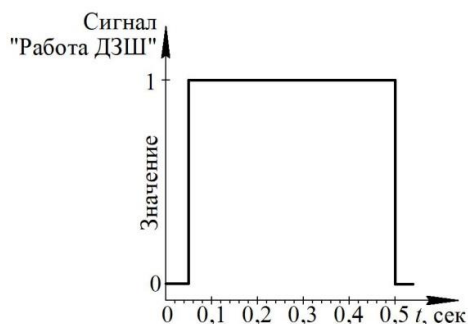


Рис. 5. Осциллограмма срабатывания ДЗШ
Fig. 5. Oscillogram of busbar differential protection operation

На осциллограмме видно, что дифференциальная защита шин сработала в момент времени $t = 0,05$ с, а протекание тока короткого замыкания на секции шин прекратилось в момент времени $t = 0,5$ с. При анализе полученной осциллограммы в ходе моделирования логической части ДЗШ выявлено, что результат соответствует работе терминала в условиях эксплуатации в энергосистеме, а это, в свою очередь, подтверждает адекватность модели.

Применение компьютерного моделирования работы логической части ДЗШ значительно упрощает контроль и анализ режимов работы дифференциальной защиты. Быстрота реакции микропроцессорной защиты на возникновение аварийных ситуаций сокращает время устранения неполадок, что напрямую влияет на увеличение коэффициента готовности (K_r) ДЗШ – важного показателя надежности энергосистемы, который характеризует способность защиты выполнять свои функции в любой момент времени. В случае недоотпуска электроэнергии ущерб зависит как от времени перерыва и значения ограничения, так и от числа случаев перерыва питания [5]. Коэффициент готовности показывает вероятность того, что устройство будет работоспособно в произвольный момент времени, кроме периодов выполнения планового технического обслуживания (ТО). Высокий коэффициент готовности свидетельствует о надежной и эффективной работе ДЗШ, минимизируя риски отказов и повышая общую безопасность энергосистемы.

Повышение K_r приводит к снижению вероятности ложных отключений, снижению времени простоя оборудования, повышению надежности электроснабжения потребителей. Снижение времени срабатывания $T_{ср}$ позволит: ограничить величину тока КЗ, протекающего через оборудование; уменьшить термическое воздействие тока КЗ; повысить устойчивость энергосистемы; повысить безопасность персонала. Коэффициент готовности K_r для дифференциальной защиты секций шин, выполненной на электромеханической и микропроцессорной базе за год, рассчитаем по формуле

$$K_r = \frac{T_0}{T_0 + T_B}, \quad (1)$$

где T_0 – средняя наработка на отказ за год, $T_0 = 8760$ ч; T_B – среднее время восстановления одного отказа.

$$K_{r(ЭМ)} = \frac{8760}{8760 + (0,1 \cdot 24)} = 0,999726;$$

$$K_{r(МП)} = \frac{8760}{8760 + (0,01 \cdot 4)} = 0,99995.$$

Сравнение показателей надежности дифференциальной защиты секций шин, выполненной на различной базе, показано в таблице.

Таблица. Сравнение показателей надежности
Table. Comparison of reliability indicators

Параметр	Вероятность отказа	Время восстановления	Расчетный K_r	ΔK_r , %	Время срабатывания $T_{ср}$, мс
Электромеханическая ДЗШ	0,1	24 ч	0,99726	0,3	100
Микропроцессорная ДЗШ	0,01	4 ч	0,99995		20

В итоге технически обосновано, что замена электромеханической дифференциальной защиты секций шин на микропроцессорную ДЗШ приведет к: существенному повышению надежности защиты (увеличению K_r); значительному снижению времени срабатывания (уменьшению $T_{ср}$); повышению чувствительности и точности защиты; расширению функциональных возможностей. А поскольку в совокупности эти преимущества обеспечивают повышение надежности и безопасности электроснабжения, снижение риска повреждения оборудования, а также снижение затрат на обслуживание, то с технической точки зрения замена ЭМ ДЗШ на МП ДЗШ является целесообразной и обоснованной.

Заключение

В рамках проведенной работы реализована модель ДЗШ подстанции 110/35/6 Таганай на основе терминала БЭ2704 с помощью отечественного программного комплекса *SimInTech*. Рассчитаны показатели надежности – коэффициент готовности и время срабатывания защиты. Оптимизация конфигурации и настроек защиты посредством модели позволяет снизить время пусконаладочных работ на реальных объектах, уменьшить время простоя оборудования и минимизировать риски аварийных ситуаций. Это особенно важно для крупных энергообъектов, где стабильность и бесперебойность работы имеют критическое значение. Результаты исследования могут быть использованы для модернизации существующих систем релейной защиты и повышения общей эффективности функционирования энергетических комплексов.

Список источников

- Бондарев А.В., Федоров С.В., Богданов А.В. Микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматизации в электроэнергетических системах: учебное пособие. Казань: Бук, 2020. 99 с.
- Исследование эффективности работы делительной автоматики в системе электроснабжения промышленного предприятия черной металлургии / О. В. Газизова, А. В. Малафеев, В. М. Тарасов и др. // Промышленная энергетика. 2012. № 10. С. 12–17.
- Жраков С.В., Зацепина В.И. Внедрение микропроцессорных устройств релейной защиты в электроэнергетическую систему России // Modern Science. 2020. № 12-3. С. 246-248.
- Разработка моделей дифференциальных защит сборных шин в программном комплексе PSCAD / П.А. Звада, Шагимарданов П.Д., Тучина Д.С., Стребкова Т.В., Дзыбов Д.Р. // Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований – 2022: материалы XXIX международной научно-практической конференции. Bengaluru, 2022. С. 123-132.
- Ковалёв Д. В. Анализ методов выбора комплектов защит для терминалов релейной автоматики // Автоматика и вычислительная техника в промышленности. 2022. №4. С. 34-40.
- Анализ неселективных действий дифференциальных защит сборных шин при внешних однофазных коротких замыканиях с насыщением трансформатора тока в неповрежденной фазе / С.Л. Кузнецов, А.А. Дегтярев, Н.А. Дони и др. // Релейная защита и автоматизация. Серия «Наука». 2019. №1 (34). С. 28-36.
- Новаш И. В. Моделирование энергосистем и испытание устройств релейной защиты в режиме реального и модельного времени // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2017. №3. С. 198-210.
- Сафина З. Р., Хусаинова Е.А. Микропроцессорные устройства релейной защиты // Научный альманах. 2020. № 11-2(73). С. 97-99.
- Validation of diagnostic monitoring technical state of iron and steel works transformers / Khramshin V.R., Nikolayev A.A., Evdokimov S.A., Kondrashova Y.N., Larina T.P. // 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. 2016. Pp. 596–600. DOI: 10.1109/EICONRUSNW.2016.7448253.
- Сипягина П. С. Анализ существующих методов и средств расчёта устройств релейной защиты и автоматизации // Молодой ученый. 2023. № 38 (485). С. 19-21.
- Скубакова С. А. Внедрение современных микропроцессорных терминалов РЗА // Актуальные проблемы науки и техники: сборник научных статей по материалам XIII Международной научно-практической конференции. Уфа: ООО «Научно-издательский центр "Вестник науки"», 2023. С. 89-94.
- СТО 34.01-4.1-011-2020. Стандарт организации группы компаний «Россети». Рекомендации по модернизации, реконструкции и замене длительно эксплуатирующихся устройств релейной защиты и автоматизации энергосистем. ПАО «Россети». 2020. 48 с.
- Таваров С.Ш., Сидоров А.И., Толстоухова И.А. Анализ моделей и методов машинного обучения в задачах прогнозирования электропотребления // Известия Тульского государственного университета. 2024. №7. С. 153-156.
- Таубес И.Р. Дифференциальная защита шин 110-220 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1984. 96 с.
- Baishev Yu.T., Kugusheva N.N. Development of a model of a microprocessor relay protection and automation device in MatLab // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2022, no. 33, pp. 39-43. DOI: 10.26160/2474-5901-2022-33-39-43.
- Тойдеряков Н.А., Кошельков И.А. Создание и применение модели дифференциальной токовой защиты

- шин с использованием цифрового комплекса моделирования реального времени // Электроэнергетика глазами молодежи – 2016: материалы VII Международной молодёжной научно-технической конференции. В 3-х т. Т. 1. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2016. С. 411-414.
17. Федоров В.А. Библия релейной защиты и автоматики. Новосибирск: Изд-во НИПК, 2004. 278 с.
18. Шабад М.А., Левуш Е.В. Изучение цифровых реле на персональном компьютере: учебное пособие. Санкт-Петербург: Минэнерго, 2001. 42 с.
19. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
20. Шумов М.Е., Гусев Ю.А. Модернизация системы РЗА на подстанции 220/110 кВ в рамках цифровой трансформации // Молодой учёный. Серия «Технические науки». 2025. №3(554). С. 52–57.
21. Ушаков В.Я. Современные проблемы электроэнергетики: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. 447 с.
22. Шмурьев В.Я. Цифровые реле защиты. М.: НТФ «Энергопрогресс», 1999. 56 с.
23. Шкаф защиты сборных шин типа ШЭ2607 065. Руководство по эксплуатации. Чебоксары: ООО НПП «ЭКРА», 2023. 278 с.
7. Novash I.V. Modeling of power systems and testing of relay protection devices in real and model time. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh oyedineniy SNG* [Energy. News from higher education institutions and energy associations of the CIS]. 2017;(3):198-210. (In Russ.).
8. Safina Z.R., Khusainova E.A. Microprocessor-based relay protection devices. *Nauchnyy almanakh* [Scientific almanac]. 2020;(11-2(73)):97-99. (In Russ.).
9. Khramshin V.R., Nikolayev A.A., Evdokimov S.A., Kondrashova Y.N., Larina T.P. Validation of diagnostic monitoring technical state of iron and steel works transformers. 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. 2016:596-600. DOI: 10.1109/EICONRUSNW.2016.7448253.
10. Sipyagina P.S. Analysis of existing methods and means for calculating relay protection and automation devices. *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. 2023;(38(485)):19-21. (In Russ.).
11. Skubakova S.A. Implementation of modern microprocessor terminals for relay protection and automation. Aktualnyye problemy nauki i tekhniki: Sbornik nauchnykh statey po materialam XIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Current issues in science and technology. Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference]. Ufa: LLC Scientific Publishing Center Bulletin of Science, 2023, pp. 89-94. (In Russ.).
12. State standard GOST 34.01-4.1-011-2020. Rosseti Group of Companies Organization Standard. Recommendations for the modernization, reconstruction, and replacement of long-term power system relay protection and automation devices. PJSC Rosseti, 2020, 48 p. (In Russ.).
13. Tavarov S.Sh., Sidorov A.I., Tolstoukhova I.A. Analysis of machine learning models and methods in electricity consumption forecasting tasks. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta* [News of Tula State University]. 2024;(7):153-156. (In Russ.).
14. Taubes I.R. *Differentsialnaya zashchita shin 110-220 kV* [Differential protection of 110-220 kV busbars]. Moscow: Energoatomizdat, 1984, 96 p. (In Russ.).
15. Baishev Yu.T., Kugusheva N.N. Development of a model of a microprocessor relay protection and automation device in MatLab. Journal of Advanced Research in Technical Science. 2022;(33):39-43. DOI: 10.26160/2474-5901-2022-33-39-43.
16. Toyderyakov N.A., Koshelkov I.A. Creation and application of a model of differential current protection of buses using a digital real-time modeling complex. *Elektroenergetika glazami molodezhi* – 2016: Materialy VII Mezhdunarodnoy molodozhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Electric Power Industry through the Eyes of Youth – 2016. Proceedings of the VII International Youth Scientific and Technical Conference]. Kazan: Kazan State Power Engineering University, 2016, vol. 1, pp. 411-414. (In Russ.).
17. Fedorov V.A. *Bibliya reley noy zashchity i avtomatiki* [The Bible of relay protection and automation]. Novosibirsk: NIPK, 2004, 278 p. (In Russ.).
18. Shabad M.A., Levush Ye.V. *Izucheniye tsifrovyykh rele na personalnom kompyutere: uchebnoye posobiye* [Study of digital relays on a personal computer: a tutorial]. Saint Petersburg: Ministry of Energy, 2001, 42 p. (In Russ.).
1. Bondarev A.V., Fedorov S.V., Bogdanov A.V. *Mikroprotsessornyye ustroystva reley noy zashchity i avtomatizatsii v elektroenergeticheskikh sistemakh: uchebnoye posobiye* [Microprocessor-based relay protection and automation devices in electric power systems: a tutorial]. Kazan: Buk, 2020, 99 p. (In Russ.).
2. Gazizova O.V., Malafeev A.V., Tarasov V.M. et al. Study of the efficiency of dividing automation in the power supply system of an industrial ferrous metallurgy enterprise. *Promyshlennaya energetika* [Industrial energy]. 2012;(10):12-17. (In Russ.).
3. Zhrakov S.V., Zatschina V.I. Implementation of microprocessor-based relay protection devices in the Russian electric power system. *Modern Science* [Modern Science]. 2020;(12-3):246-248. (In Russ.).
4. Zvada P.A., Shagimardanov P.D., Tuchina D.S., Strebkova T.V., Dzybov D.R. Development of busbar differential protection models in the PSCAD software package. *Aktualnyye napravleniya fundamentalnykh i prikladnykh issledovaniy* – 2022: Materialy XXIX mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Current areas of fundamental and applied research – 2022. Proceedings of the XXIX international scientific and practical conference] Bengaluru, 2022, pp. 123-132. (In Russ.).
5. Kovalev D.V. Analysis of methods for selecting protection kits for relay automation terminals. *Avtomatika i vychislitel'naya tekhnika v promyshlennosti* [Automation and computing in industry]. 2022;(4):34-40. (In Russ.).
6. Kuzhekov S.L., Degtyarev A.A., Doni N.A. et al. Analysis of non-selective actions of differential protection of busbars during external single-phase short circuits with saturation of the current transformer in the undamaged phase. *Reley naya zashchita i avtomatizatsiya. Seriya «Nauka»* [Relay protection and automation. Science Series]. 2019;(1 (34)):28-36. (In Russ.).

References

19. Shneyerson E.M. *Tsifrovaya releynaya zashchita* [Digital relay protection]. Moscow: Energoatomizdat, 2007, 549 p. (In Russ.)
20. Shumov M.E., Gusev Yu.A. Modernization of the relay protection and automation system at the 220/110 kV substation within the framework of digital transformation. *Molodoy uchenyy. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»* [Young scientist. Series Engineering Sciences]. 2025;3(554):52-57. (In Russ.)
21. Ushakov V.YA. *Sovremennyye problemy elektroenergetiki: uchebnoye posobiye* [Modern problems of electric power industry: a textbook]. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2014, 447 p. (In Russ.).
22. Shmuryev V.YA. *Tsifrovyye rele zashchity* [Digital protection relays]. Moscow: NTF Energoprogress, 1999, 56 p. (In Russ.)
23. Busbar protection cabinet type ШЭ2607 065. Operation manual. Cheboksary: OOO NPP EKRA, 2023, 278 p. (In Russ.)

Поступила 29.12.2025; принята к публикации 15.05.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 29/12/2025; revised 15/05/2026; published 30/09/2026

Трофимова Светлана Николаевна – кандидат технических наук, доцент,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: trofimovasn@susu.ru ORCID 0000-0002-6803-9564

Сергеев Юрий Сергеевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: sergeevys@susu.ru ORCID 0000-0003-1028-8346

Платов Сергей Иосифович – доктор технических наук, заведующий кафедрой,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: mitodim@magtu.ru ORCID 0000-0002-4868-4881

Толмачев Евгений Владимирович – старший преподаватель,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: tolmatchev@susu.ru ORCID 0009-0004-4960-6828

Резников Иван Максимович – студент,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: shkola2154@yandex.ru; ORCID 0009-0006-6396-0019

Svetlana N. Trofimova – PhD (Eng.), Associate Professor,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: trofimovasn@susu.ru ORCID 0000-0002-6803-9564

Yuriy S. Sergeev – PhD (Eng.), Head of Department,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: sergeevys@susu.ru ORCID 0000-0003-1028-8346

Sergey I. Platov – DrSc (Eng.), Head of Department,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: mitodim@magtu.ru ORCID 0000-0002-4868-4881

Evgeniy V. Tolmachev – Senior Lecturer,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: tolmatchev@susu.ru ORCID 0009-0004-4960-6828

Ivan M. Reznikov – Student,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: shkola2154@yandex.ru ORCID 0009-0006-6396-0019

ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ ECONOMICS, MANAGEMENT AND PRODUCT MARKET

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 656.222.3
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-188-200



АНАЛИЗ ОПЫТА И ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕВОЗОЧНЫМ ПРОЦЕССОМ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Бессоненко С.А., Осипов Н.И.

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

Аннотация. На современном этапе цифровизация транспортной сферы обусловила предпосылки для трансформации железнодорожного транспорта, в связи с чем в детальном исследовании нуждается потенциал искусственного интеллекта (ИИ) для повышения эффективности перевозок. Целью статьи является систематизация методов, опыта и перспектив использования ИИ при управлении перевозочным процессом на железнодорожном транспорте. Проведен обзор нормативной литературы, научных публикаций и реализованных проектов в данной сфере за последнее десятилетие, в течение которого ИИ стал одним из драйверов развития транспорта. В результате проведенного анализа выделены технологические тренды интеграции ИИ в эксплуатационную работу, проектирование инфраструктуры и логистику железнодорожного транспорта (машинное обучение, компьютерное зрение, цифровые двойники). Определены области применения ИИ от прогнозирования спроса и планирования на стратегическом уровне до нейросетевого моделирования тяговых расчетов. Систематизированы преимущества (рационализация использования пропускной способности, снижение себестоимости перевозок, повышение надежности и безопасности функционирования инфраструктуры) и барьеры внедрения ИИ (качество и разнородность данных, нормативное регулирование, специфика перевозочного процесса). Обоснована целесообразность использования ИИ для уменьшения неопределенности при выборе эффективной системы интервального регулирования движения поездов на однопутных железнодорожных участках. Дальнейшие исследования по внедрению ИИ в управление перевозочным процессом должны быть сосредоточены на создании адаптивных систем управления, интеграции разнородных данных, разработке отраслевого стандарта и интеграции тренировочных сред в учебный процесс инженеров путей сообщения.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, управление перевозочным процессом на железнодорожном транспорте, цифровой двойник, прогнозная аналитика, интеллектуальные системы

© Бессоненко С.А., Осипов Н.И., 2026

Для цитирования

Бессоненко С.А., Осипов Н.И. Анализ опыта и перспектив применения искусственного интеллекта для управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 188-200. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-188-200>



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

ANALYSIS OF EXPERIENCE AND PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO RAILWAY TRANSPORT OPERATIONS MANAGEMENT

Bessonenko S.A., Osipov N.I.

Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia

Abstract. At the present stage, the digitalization of the transport sector has created prerequisites for the transformation of railway transport, making it necessary to conduct a detailed study of the potential of artificial intelligence (AI) for improving transportation efficiency. The aim of this paper is to systematize the methods, practical experience, and prospects for the use of AI in railway transport operations management. A review of regulatory documents, scientific publications, and implemented projects in this field over the past decade has been conducted, during which AI has become one of the key drivers of transport development. The analysis has identified technological trends in the integration of AI into railway operations, infrastructure design, and logistics, including machine learning, computer vision, and digital twins. The areas of AI application have been identified, ranging from demand forecasting and strategic-level planning to neural-network-based traction calculation modeling. The advantages of AI implementation (more efficient utilization of line capacity, reduced transportation costs, and improved reliability and safety of infrastructure) as well as barriers to its implementation, including data quality and heterogeneity, regulatory requirements, and the specific characteristics of the transportation process, have been systematized. The feasibility of using AI to reduce uncertainty in selecting an effective train traffic interval regulation system for single-track railway sections is substantiated. Further research into the implementation of AI in railway transport operations management should focus on developing adaptive control systems, integrating heterogeneous data, developing an industry-specific standard, and incorporating training environments into the educational process for railway engineering students.

Keywords: artificial intelligence, machine learning, railway transport operations management, digital twin, predictive analytics, intelligent systems

For citation

Bessonenko S.A., Osipov N.I. Analysis of Experience and Prospects for the Application of Artificial Intelligence to Railway Transport Operations Management. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 188-200. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-188-200>

Введение

На современном этапе развития железнодорожного транспорта имеются следующие вызовы: переориентирование грузопотоков на восток, потребность в обновлении инфраструктуры, геополитические риски, необходимость повышения эффективности. Решение данных задач требует цифровизации всех бизнес-процессов в весьма сжатые сроки (к 2030 году в соответствии с указаниями руководства ОАО «РЖД»), в связи с чем необходимо вести работу по выделению приоритетных проектов. Данные проекты должны быть ориентированы на интеграцию мультимодальных перевозок, развитие клиентских сервисов, оптимизацию графика движения и плана формирования поездов, автоматизацию процессов на ключевых станциях сети и технологическую независимость.

Решение задач по реагированию на обозначенные вызовы сопряжено со сбором, анализом и интерпретацией большого объема данных различного рода, обработка которых с помощью аналитического (вследствие недостаточной точности) или имитационного (вследствие трудоемкости) моделирования не может считаться исчерпывающей. Развитие вычислительных мощностей позволило к аналитическому и имитационному модели-

рованию добавить новый инструмент для поддержки принятия решений – искусственный интеллект (ИИ).

В соответствии с [1] ИИ – это способность технической системы имитировать когнитивные функции человека и получать при выполнении конкретных практически значимых задач обработки данных результаты, сопоставимые, как минимум, с результатами интеллектуальной деятельности человека. Следует отметить, что внедрение ИИ на отечественном железнодорожном транспорте сопряжено с двумя особенностями – значительной протяженностью сети и наличием унаследованных систем управления перевозочным процессом. Под унаследованными системами в данном случае понимается совокупность программного обеспечения и программно-аппаратных комплексов, нуждающаяся в адаптации к современным условиям перевозочного процесса (в частности, к необходимости взаимодействия с ИИ). Данные обстоятельства предопределили точечный характер внедрения ИИ на сети железных дорог ОАО «РЖД». При этом необходим системный анализ целесообразности внедрения ИИ во избежание необоснованного его использования.

Основным документом, излагающим порядок внедрения ИИ в транспортные бизнес-процессы, является Белая книга ИИ в сфере транспорта и логисти-

ки [2]. В качестве требований для железнодорожного транспорта Белой книгой установлены безопасность, точность до минут, учет состояния инфраструктуры. К особенностям отнесены значительные объемы телеметрии, геопространственных и исторических данных. В качестве типичных ИИ-решений выделены предиктивное обслуживание, оптимизация графика движения поездов (ГДП), автоведения поездов.

Классификация технологий ИИ с указанием количества их упоминания в качестве ключевых слов к научным публикациям и количества проектов в сфере управления перевозками в соответствии с [3] представлена на **рис. 1**.

Целью данной статьи является проведение анализа возможностей, существующих решений и перспективных направлений применения ИИ для повышения эффективности, гибкости и надежности управ-

ления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- классифицировать технологии ИИ и оценить степень их интеграции в перевозочный процесс на отечественном железнодорожном транспорте;
- проанализировать мировой опыт, перспективные направления и проблемы применения ИИ в управлении поездопотоками, планировании перевозок и проектировании инфраструктуры;
- на примере решения задачи выбора системы интервального регулирования движения поездов на железнодорожном участке определить положение ИИ в алгоритмике робастного управления перевозочным процессом.

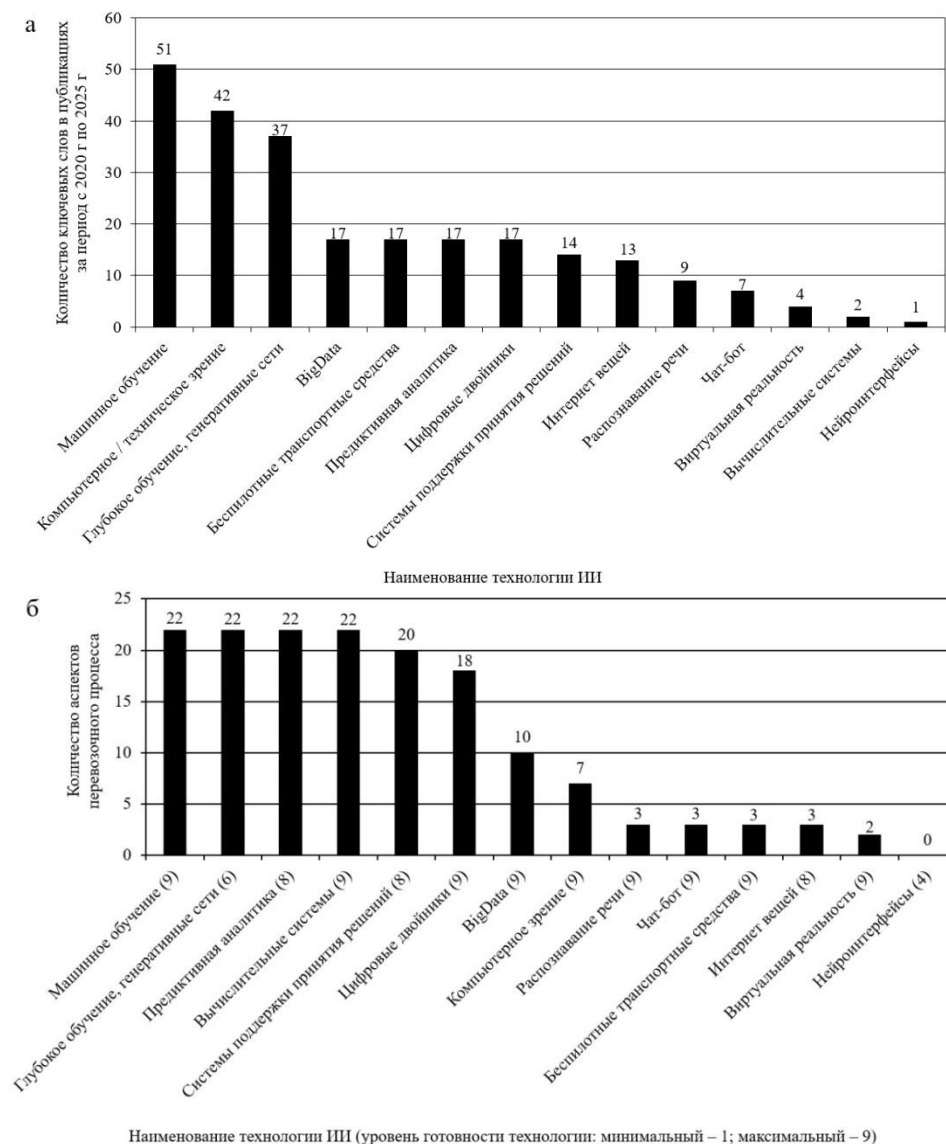


Рис. 1. Технологии ИИ, упоминаемые в качестве ключевых слов к рецензируемым публикациям (а) и используемые в перевозочном процессе (б)

Fig. 1. AI technologies mentioned as keywords in peer-reviewed publications (a) and used in railway transportation operations (б)

Характеристика технологий ИИ, применяемых для управления перевозочным процессом и степень их внедрения на ОАО «РЖД»

На данный момент имеет место ряд отечественных исследований по внедрению ИИ в управление перевозками. Основными их выводами являются:

- целесообразность применения ИИ для построения энергоэффективного ГДП (посредством системы «ЭЛЬБРУС») с целью реакции на изменения в сочетании с детерминированными алгоритмами для логического обоснования [4];
- важность машинного обучения при регулировании вагонопотоков с целью минимизации нарушений сроков доставки [5], в том числе на основе «Динамической модели загрузки инфраструктуры» (ДМЗИ) [6];
- возможность перехода к нейросетевому управлению с выработкой последовательности действий поездного диспетчера (без снятия с него ответственности) по совершенствованию параметров поездной работы [7].

Классификация подходов ИИ, достоинства, недостатки и область их применения в управлении перевозочным процессом представлены на **рис. 2**.

Следует отметить, что за последние пять лет отсутствуют научные публикации по применению символического ИИ для управления процессами перевозок, поскольку он уступил место более гибким технологиям – методам машинного обучения, способным адаптироваться к изменяющимся условиям перевозочного процесса в реальном времени.

Суть эволюционного подхода (в частности, генетических алгоритмов) – стохастическая оптимизация с использованием механизмов естественного отбора. Они позволяют находить оптимальное решение среди множества вариантов, что делает возможным их применение для оперативного планирования. Так, в работе [8] на основе анализа 500000 записей о грузоперевозках РЖД за два года представлена возможность применения генетического алгоритма для оптимизации ГДП.

В отличие от лишенных «прозрачности» глубоких нейросетей, ансамблевые методы могут применяться для задач, решение которых должно быть не только точным, но и обоснованным. К данным методам относится метод случайного леса (проводится опрос всех решающих деревьев) и градиентного бустинга (проводится последовательное обучение каждого решающего дерева на основе ошибок предыдущего). Анализ публикаций позволил установить:

- возможность применения случайного леса для расчета ускорения поезда в зависимости от массы, скорости, используемой силы тяги, уклона пути [9];
- эффективность применения градиентного бустинга в сравнении со случайным лесом для анализа вероятности нарушения машинистом безопасности движения [10];
- состоятельность случайного леса и градиентного бустинга для прогнозирования энергозатрат тягового подвижного состава [11].

Основой систем глубокого обучения является многослойный персептрон. Многослойный персептрон является нейронной сетью прямого распространения с несколькими слоями (входным, скрытыми, выходным).

Многослойный персептрон применяется в качестве самостоятельной архитектуры, если зависимости в данных относительно просты. Он не требует значительных вычислительных ресурсов и является универсальным аппроксиматором. Например, известны:

- блок прогноза системы управления сортировочной станцией [12];
- исследование устойчивости системы курсирования кольцевых маршрутных поездов со случайными значениями грузопотока [13];
- набор нейросетевых моделей планирования работы малоинтенсивной железнодорожной линии [14];
- метод прогнозирования пассажиропотока на высокоскоростной магистрали (с учетом как прямого, так и скрытого спроса) [15].

Значительное внимание обращают на себя технологии компьютерного зрения (анализа изображений) и технического зрения (автоматического действия на основе результатов анализа). Так, на данный момент существуют:

- принципы системы поддержки принятия решений машинистом локомотивов [16] на основе идентификации объектов;
- решения для распознавания номера вагона по изображению [17], правильности погрузки груза на открытом подвижном составе [18];
- комплекс для повышения безопасности при проведении путевых работ [19];
- концепция прогнозирования работы сортировочной станции на основе данных «от колеса» и технического зрения [20];
- «сканер эмоций», который анализирует мимику пассажиров для повышения качества сервиса [21].

Ансамблевые методы выявляют статические зависимости в данных, однако определяющая характеристика перевозочного процесса – эволюция во времени. Рекуррентные нейронные сети, в особенности архитектуры с долгой краткосрочной памятью (LSTM), представляют собой модель, обладающую «памятью». Данное свойство позволяет решать задачи, где прогноз зависит как от текущего состояния, так и от предыстории процесса. На данный момент с применением рекуррентных нейросетей:

- возможно определение оптимальной позиции контроллера машиниста [22];
- установлены закономерности в последовательности предпосылок нештатных ситуаций и проведен регрессионный анализ временных рядов о задержках [8];
- может прогнозироваться логистическая обстановка на основе данных о движении транспортных потоков [23].

В условиях, когда данные от железнодорожных датчиков не имеют готовых «подписей», методы обучения без учителя открывают путь к проактивному управлению перевозочным процессом. Эти алгоритмы исследуют неразмеченные данные, группируя сходные события и обнаруживая закономерности. К настоящему моменту в научной литературе имеют место:

- выявление аномалий в устройствах передачи кода на сигнальной точке на базе данных системы технической диагностики без необходимости ручного анализа диагностируемых параметров [24];

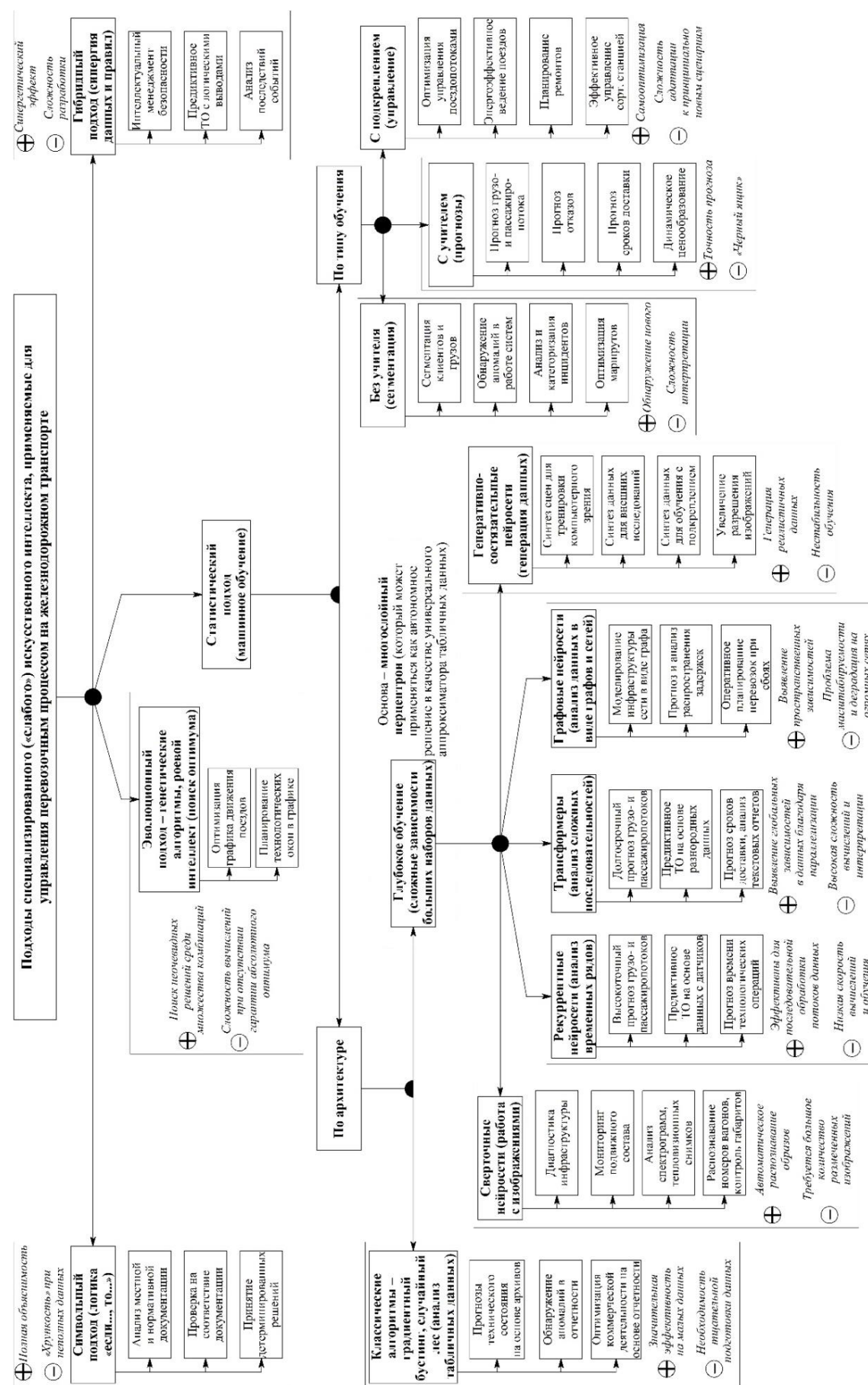


Рис. 2. Характеристика подходов ИИ
Fig. 2. Characteristics of AI approaches

– возможность применения обучения без учителя для прогноза рисков работы железнодорожной линии на основе размеров движения, простоев, отказов и технологических окон [25].

Обучение с учителем – это метод машинного обучения, при котором модель обучается на примерах с известными «правильными ответами». Модель получает массивы данных (например, ГДП, записи с датчиков, изображения инфраструктуры), в которых каждый пример содержит как условие, так и итог – «разметку». Например, в исследовании [26] рассматривается обучение искусственной нейросети для повышения точности тяговых расчетов при использовании в качестве «учителя» эталонных данных о режиме движения поезда, полученных методом динамического программирования.

Обучение с подкреплением – это метод ИИ, в котором агент учится вырабатывать стратегию действий через взаимодействие со средой, получая от неё сигналы вознаграждения или штрафа. Цель агента – добиться максимального вознаграждения. В отечественной научной литературе изложены:

– успешное применение обучения с подкреплением моделей для управления движением поездов в качестве поездного диспетчера на цифровой модели железнодорожного участка [27];

– перспективность применения обучения с подкреплением при организации движения виртуально соединенных поездов [28];

– мультиагентная модель обучения с подкреплением, продемонстрировавшая на модели станции в сравнении с жадным алгоритмом и симплекс-методом сокращения простоев поездов, энергозатрат и отсутствие столкновений [29].

В последние годы активное развитие получили гибридные нейросетевые модели, позволяющие перекрыть недостатки «чистых» архитектур. Наиболее часто в сочетании с другими архитектурами используют графовые нейросети, обеспечивающие моделирование сетевой топологии. Так, в работе [30] представлена комбинация графовой и рекуррентной нейросетей, имитационного моделирования, динамической оптимизации и линейного программирования в форме блока оперативного управления станцией.

Мировой опыт, проблемы и перспективы применения искусственного интеллекта для управления перевозочным процессом

За рубежом (как и в России) наибольшее внимание сосредоточено на интеграции в управление перевозочным процессом компьютерного зрения и глубокого обучения. Значительный научный интерес представляют особенности внедрения ИИ на иностранном железнодорожном транспорте.

В статье [31] описывается специфика внедрения ИИ в управление перевозками в Китае, США и Евросоюзе. Данный процесс имеет много общих черт с Россией. Например, с целью прогнозирования задер-

жек поездов используются рекуррентные нейросети, для оптимизации расписаний применяется обучение с подкреплением, машинное обучение дополняется классическими подходами для устойчивости решений. В то же время развиваются мультиагентные системы, где поезда или диспетчеры выступают в роли агентов, обеспечивающих децентрализованное управление движением, что противоречит принципу иерархии на ОАО «РЖД».

Интересен опыт Китая, обладающего развитой сетью высокоскоростных магистралей. В статье [32] выделены три направления для высокоскоростного железнодорожного транспорта: планирование пассажирских перевозок, прогнозирование пассажиропотока и развитие ИИ-платформ. Проанализированы генетические алгоритмы для оптимизации остановок, LSTM-модели для прогнозирования спроса и цифровые двойники. Особенностью китайского подхода является системность внедрения ИИ: прогнозные модели пассажиропотока связаны с алгоритмами составления расписаний, а цифровые двойники используются как для оперативного, так и для долгосрочного планирования.

В рассмотрении нуждаются китайские исследования по интеграции ИИ в радиосвязь. Так, работа [33] посвящена применению генеративно-состязательных сетей для оценки канала связи на высокоскоростной магистрали. Авторы предлагают подход, при котором генератор создает правдоподобные характеристики канала, а дискриминатор учится отличать их от реальных. Так генератор приобретает способность предсказывать состояние канала для обеспечения стабильности связи.

Метод, изложенный в работе британских ученых [34], основан на анализе топологии сети с формированием «отпечатков» станций в виде векторов и их синтеза в единый образ всего маршрута движения поезда с его подачей на вход модели машинного обучения. Подобный подход, позволяющий алгоритму выявлять критические по задержкам участки сети, мог бы дополнить существующие в России методы анализа устойчивости графиков движения.

Важным трендом является развитие федеративного ИИ для сохранения коммерческой тайны при взаимодействии участников перевозочного процесса. В этой парадигме исходные данные остаются локальными, доступ предоставляется только к обновлениям моделей, что обеспечивает конфиденциальность и совместное обучение. Федеративный ИИ может повысить точность прогнозирования трафика и гибкость систем управления движением без централизации данных о поездах. Для его развития необходимы выбор масштабируемой архитектуры в сетях связи и разработка механизмов агрегирования данных [35].

Научный интерес представляет применение трансформеров. Данная архитектура может быть адаптирована для прогнозирования пространственно-временных взаимодействий в транспортных системах. При этом для обучения трансформера требуются значительные объемы данных. Проанализированные

работы иллюстрируют три подхода применения трансформеров.

Первый подход предполагает применение «чистого» трансформера. Так, во французском исследовании [36] выполняется прогноз распространения задержек в реальном времени для всей сети на основе трансформера. Механизм «самовнимания» (лежащий в основе трансформера) позволяет модели анализировать состояние более 3000 поездов на горизонте до 70 мин и выявлять силу влияния каждого поезда на другие. На вход модель получает актуальные данные о местоположении, расписании и задержках каждого поезда. Механизм «самовнимания» вычисляет взаимосвязи между всеми поездами.

Второй подход связан с созданием гибрида. В китайском исследовании [37] используется LSTM-трансформер-модель, преодолевающая ограничения рекуррентных сетей при обработке временных последовательностей. LSTM извлекает из архивных данных зависимости и преобразует их в векторы. Эти векторы поступают на вход трансформера для прогноза на основе выявления неочевидных взаимосвязей. Таким образом, симбиоз двух архитектур позволяет сохранить преимущества LSTM для работы с временными рядами и трансформера для параллельной обработки данных.

Основой третьего подхода является сравнение разных способов гибридизации. Так, американское исследование [38] посвящено системному сравнению сочетаний LSTM и трансформера для измерения профиля переездов с оценкой их эффективности на данных с датчиков. Наиболее эффективными оказались архитектуры, в которых LSTM и трансформер работают параллельно или последовательно с LSTM на первом этапе. Успешные модели эффективно сочетали способность LSTM улавливать зависимости в данных датчиков с механизмом «самовнимания» трансформера для выявления взаимосвязей в профиле.

Исследователи сходятся во мнении, что ИИ сохраняет потенциал оптимизации железнодорожного транспорта посредством управления пропускной способностью [39]. Дальнейшее развитие ИИ неразрывно связано с технологиями 5G, интернетом вещей, граничными вычислениями и блокчейном [35]. Отмечается возможность перехода к интеллектуализации, при которой роботы работают с документами, освобождая персонал для творческих задач [40]. Это ведет к трансформации профессий, например к появлению машиниста-оператора [39]. Важным инструментом называются цифровые двойники, позволяющие обучать нейросети без рисков для производства. В таблице представлены примеры решения актуальных задач управления перевозками с помощью ИИ.

Проведенный анализ подходов к внедрению ИИ свидетельствует о том, что Россия, Китай, США и Евросоюз рассматривают ИИ в качестве инструмента для повышения безопасности и эффективности. Однако их стратегии внедрения ИИ предполагают как точечную модернизацию и решение проблем фрагментации (Россия, Евросоюз), так и масштабные про-

екты и стремление к автономности (Китай, США). При этом ключевые вызовы связаны с интеграцией ИИ в унаследованные системы, обеспечением кибербезопасности и преодолением нормативных барьеров.

Выбор системы интервального регулирования движения поездов на железнодорожном участке с применением ИИ

Актуальным способом повышения эффективности перевозок является развитие систем автоматики и телемеханики. Появление бессветофорных систем интервального регулирования движения поездов (СИРДП) сделало необходимым сокращение неопределенности при выборе режима эксплуатации железнодорожных полигонов. Оценку эффективности СИРДП следует производить с учетом коэффициентов заполнения пропускной способности, влияния дестабилизирующих факторов и экономической эффективности.

Основной проблемой при решении данной задачи является необходимость рассмотрения сочетаний управленческих решений и дестабилизирующих факторов. В ходе рассмотрения неизбежны «проклятие размерности» и «комбинаторный взрыв», сопряженные с затруднительностью моделирования работы участка в течение 24 ч при множестве сочетаний стратегий и факторов. Другой проблемой является то, что уплотнение поездопотока на одной части участков может обернуться затруднениями на другой части участков и быть неэффективным для сети в целом.

В рамках данной статьи предлагается две постановки (рис. 3).

Прямая постановка задачи. Обеспечить развитие железнодорожного направления путем определения рациональных параметров его инфраструктуры (количество приемо-отправочных путей на промежуточных и технических станциях, количество главных путей на перегоне, СИРДП на перегонах) и технологии работы (тип графика движения поездов) с учетом дестабилизирующих факторов при условии обеспечения норматива маршрутной скорости с минимальными инвестициями. Требуется выбрать конфигурацию x^* :

$$\begin{cases} x^* = \arg \min C(x); \\ P(V(x, w) \geq V_{\text{норм}}) \geq (1 - \varepsilon), \end{cases} \quad (1)$$

где $C(x)$ – капитальные затраты при переходе к конфигурации участка x , руб.; P – вероятность выполнения норматива маршрутной скорости; w – сценарий прогона модели, предполагающий определенное состояние внешних условий на рассматриваемом участке и определенные параметры внешней среды; $V(x, w)$ – маршрутная скорость при данной конфигурации участка x и при данном сценарии w , км/ч; $V_{\text{норм}}$ – норматив маршрутной скорости, задаваемый заказчиком, км/ч; ε – задаваемая заказчиком вероятность невыполнения норматива.

Таблица. ИИ-решения актуальных задач управления процессами перевозок
Table. AI solutions for current railway transportation operations management tasks

Конкретная задача	Технология ИИ	Риски внедрения	Варианты снижения рисков
Оптимизация смешанных перевозок	Федеративный ИИ (для объединения моделей участников перевозки без обмена «сырыми» данными)	Технологические (несовместимость данных); правовые (коммерческая тайна); методологические (разработка единой целевой функции)	Разработка отраслевых протоколов обмена «обезличенными» моделями, создание пилотных проектов на основе госзаказа
Оснащение перегонов (количество главных путей, система интервального регулирования)	Гибрид на основе графовых нейросетей (для моделирования участков), генеративных (для дополнения базы данных), трансформеров (для анализа временных рядов), объяснимого ИИ	Технологические (перегруженность модели); информационные (дефицит данных по редким, но критичным событиям); нормативные (отсутствие стандартов)	Послойное моделирование каждого фактора; обучение на синтетических данных; апробация на существующих участках; введение «коэффициента надежности» (для выбора устойчивых решений)
Генеративное проектирование станций и узлов	Генеративно-состязательные сети и графовые нейронные сети (для генерации планировочных решений)	Методологические (сложность формализации требований для ИИ); кадровые (требуется «проектировщик-аналитик» данных); нормативные (отсутствие стандартов)	Выбор инженером среди множества ИИ-решений финального; тестирование на цифровых двойниках
Создание контура данных для тестирования ИИ-решений	Сквозной «железнодорожный ИИ» (с генерацией данных при их дефиците)	Технологические (разнородность исторических данных); организационные (коммерческая тайна); угроза кибербезопасности	Инициатива «сверху» по созданию стандартов данных, разработка контура данных для авторизованного доступа ученых
Формирование у инженеров путей сообщения навыков работы в симбиозе с ИИ	Адаптивные образовательные платформы; деловые игры на основе цифровых двойников; ИИ-инструменты в учебном процессе	Кадровые (консерватизм учебных программ); фундаментальные (студент может не усвоить основы профильных дисциплин)	Проведение хакатонов; применение ИИ для оптимизации (а не подмены) основ; визуализация связей между параметрами и результатом работы ИИ

Обратная постановка задачи. Обеспечить развитие железнодорожного направления путем определения рациональных параметров его инфраструктуры (количество приемо-отправочных путей на промежуточных и технических станциях, количество главных путей на перегоне, СИРДП на перегонах) и технологии работы (тип графика движения поездов) с учетом дестабилизирующих факторов при условии соблюдения предела инвестиций в его развитие. Требуется выбрать конфигурацию x^* :

$$\begin{cases} x^* = \arg \max f(x); \\ f(x) = \mu_V(x) - \lambda \cdot \sigma \cdot V(x, w); \\ C(x) \leq C(x)_{\text{норм}}, \end{cases} \quad (2)$$

где $f(x)$ – функция «полезности» (риск-скорректированный критерий) конфигурации x ; $\mu_V(x)$ – математическое ожидание участковой скорости, км/ч; λ – коэффициент штрафа за риск; σ – стандартное отклонение скорости; $V(x, w)$ – маршрутная скорость при данной конфигурации участка x и при данном сценарии внешних условий и среды w , км/ч; $C(x)$ – капитальные затраты при переходе к конфигурации участка x , руб.; $C(x)_{\text{норм}}$ – предел инвестиций в развитие участка, руб.

Параметры внешней среды E (пропускная способность прилегающих железнодорожных направлений, перерабатывающая способность примыкающих технических станций, статистика дестабилизирующих факторов) включаются в сценарий w и опреде-

ляются законами распределения. Распределение скорости определяется зависимостью

$$V(x, w) = V(x, E, w_{\text{уч}}), \quad (3)$$

где $w_{\text{уч}}$ – дестабилизирующие факторы на анализируемом железнодорожном участке (ограничения скорости, неравномерность движения, отказы технических средств и прочие), интенсивность действия которых задается на основе анализа статистических данных о перевозочном процессе на участке.

Для генерации мутаций на каждом поколении генетического алгоритма предлагается использовать генеративно-состязательную сеть, обученную на множестве целесообразных конфигураций железнодорожного участка. Полученные данным способом мутации позволяют генерировать варианты, сохраняющие внутренние связи между параметрами инфраструктуры (например, между количеством путей и выбором СИРДП). Сочетание генетического алгоритма и генеративно-состязательной сети демонстрирует состоятельность при динамической многокритериальной оптимизации благодаря более высокому качеству генерируемых решений при меньшем размере популяции, а также по соотношению числа принятых решений к общему числу сгенерированных [41].

Выводы

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Технологии ИИ трансформируют парадигму управления перевозочным процессом от реактивной к адаптивной. Цифровизация возможна только при комплексном подходе, включающем как разработку алгоритмов, так и инвестиции в цифровую инфраструктуру. Успех внедрения зависит в значительной степени

от «мягких» факторов: готовности организации к изменениям, развития человеческого капитала и адаптации нормативной среды. Кроме того, требуется конкретизация технико-экономической эффективности внедрения ИИ.

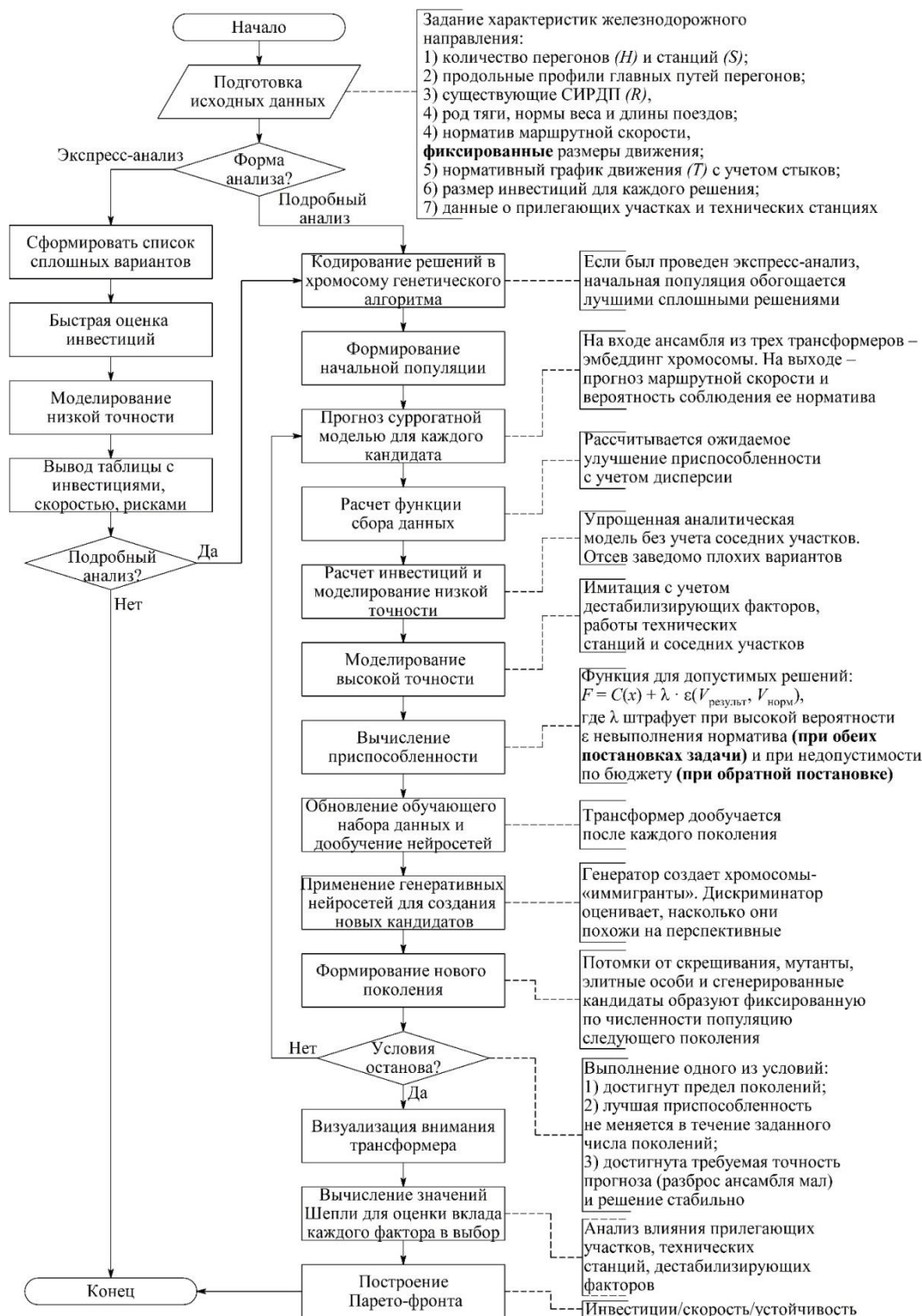


Рис. 3. Алгоритм выбора оптимального варианта СИРДП

Fig. 3. Algorithm for selecting the optimal train traffic interval regulation system

2. Достоинства ИИ носят в основном количественный и стратегический характер (снижение затрат, рост эффективности, новые возможности). Недостатки же часто имеют качественный и фундаментальный характер (проблемы доверия, ответственности, кибербезопасности, «черного ящика»). Сильная сторона ИИ – работа с большими данными и сложными нелинейными моделями – одновременно является его слабостью, выраженной в проблемах интерпретируемости и зависимости от качества данных.

3. Внедрение ИИ в перевозочный процесс должно идти по пути «гибридного интеллекта», где ИИ выступает как мощный инструмент поддержки принятия решений, а окончательный выбор и ответственность остаются за человеком (диспетчером, инженером).

4. Важнейший технологический эффект ИИ при принятии управленческих решений заключается в возможности оперативного рассмотрения их последствий. Также ИИ позволяет увеличить масштаб рассматриваемого элемента железнодорожной сети (вплоть до сети в целом) и обеспечить повышение прозрачности взаимного влияния различных сегментов сети.

5. ИИ может быть эффективно применен для решения задачи определения эффективности различных систем интервального регулирования движения поездов, о чем свидетельствует разработанный алгоритм выбора оптимальной СИРДП. Данный алгоритм является основой системы поддержки принятия решений по внедрению СИРДП с учетом дестабилизирующих факторов (ограничений скорости, неравномерности движения, отказов технических средств и прочих) на основе анализа зависимостей, определяемых в результате взаимодействия между нейросетевым и имитационным комплексами.

Список источников

1. ПНСТ 884-2023. Искусственный интеллект на железнодорожном транспорте. Варианты использования [Электронный ресурс] // Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. URL: <https://www.rst.gov.ru>. (Дата обращения: 29.03.2026).
2. Белая книга. Искусственный интеллект в сфере транспорта и логистики : отраслевой документ [Электронный ресурс] // Министерство транспорта Российской Федерации. URL: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/12167>. (Дата обращения: 29.03.2026).
3. Реестр технологий искусственного интеллекта в транспортной отрасли [Электронный ресурс] // Министерство транспорта Российской Федерации. URL: <https://mintrans.gov.ru>. (Дата обращения: 29.03.2026).
4. Кириякин В.Ю., Лобанов С.В. Перспективы использования ИИ-технологий в целях повышения энергоэффективности прогнозных графиков движения поездов // Железнодорожный транспорт. 2025. № 11. С. 4–12.
5. Организация вагонопотоков: условия, ограничения, цифровые решения / А.Ф. Бородин, К.Ю. Николаев, Р.В. Шиндеров, В.В. Прозоров // Железнодорожный транспорт. 2025. № 6. С. 11–19.
6. О возможности применения в управлении железнодорожными транспортными системами и перевозочным процессом искусственного интеллекта / А.Т. Осьминин, А.Н. Баушев, И.И. Осьминина, А.А. Шатохин // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте: сборник трудов научно-практической конференции с международным участием. М.: ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», 2022. С. 332–343.
7. Чеботарева Е.А. Развитие инструментов оценки резервов пропускной способности железнодорожных участков на базе создания цифрового двойника и применения искусственной нейронной сети // Мир транспорта и технологических машин. 2024. № 3-2(86). С. 126–131. DOI: 10.33979/2073-7432-2024-3-2(86)-126-131.
8. Третьяков Г. М., Мазько Н. Н., Варламов А. В. Применение технологий машинного обучения для автоматизации процессов планирования и управления грузовыми перевозками на железной дороге // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 4. С. 88–100. DOI: 10.17513/snt.39977.
9. Бушуев С.В., Голочалов Н.С. Моделирование движения поезда на основе применения статистических данных // Инновационный транспорт. 2024. № 1(51). С. 52–57. DOI: 10.20291/2311-164X-2024-1-52-57.
10. Кулагин М.А., Сидоренко В.Г. Поддержка принятия решения по профилактике нарушений безопасности в работе // Надежность. 2021. Т. 21. № 4. С. 38–46. DOI: 10.21683/1729-2646-2021-21-4-38-46.
11. Ларин Е.С. Прогнозирование энергетических затрат подвижного состава с использованием алгоритмов машинного обучения // Динамика систем, механизмов и машин. 2024. Т. 12. № 3. С. 130–134. DOI: 10.25206/2310-9793-2024-12-3-130-134.
12. Обухов А.Д. Нейросетевое управление сортировочными процессами // Мир транспорта. 2016. Т. 14. № 1(62). С. 138–147.
13. Казаков А.Л., Упырь Р.Ю., Доможирова А.Д. Нейросетевой подход к изучению функционирования системы курсирования кольцевых маршрутных поездов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2023. Т. 82. № 2. С. 158–167. DOI: 10.21780/2223-9731-2023-82-2-158-167.
14. Ковалев К.Е., Новичихин А.В. Процедура планирования работы малоинтенсивных железнодорожных линий: логистические аспекты и нейросетевые модели // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2023. Т. 20. № 2. С. 325–335. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-325-335.
15. Журавлева Н.А., Баталова Н.В. Алгоритм расчета прогнозного пассажиропотока инновационного железнодорожного транспорта на основе нейронной модели // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11. № 3. С. 474–485. DOI: 10.17816/transsyst688684.
16. Domanov K.I., Istomin S.G., Shatokhin A.P. Approaches to Creating a Driver Decision Support System for Digital Analysis of Railway Infrastructure Based on Machine Learning and Machine Vision Algorithms // E3S Web of Conferences : Proceedings of the 2nd International Conference on High-Speed Transport Development (HSTD 2023). Les Ulis: EDP Sciences - Web of Conferences, 2023. P. 05001. DOI: 10.1051/e3sconf/202344605001.
17. Любченко А.А., Смолин И.Ю. Особенности алгоритма распознавания номера вагона по изображению // Автоматика, связь, информатика. 2024. № 4. С. 7–9. DOI: 10.34649/AT.2024.4.4.002.

18. Смирнов Ф.А., Новичихин А.В. Автоматизация приема вагонов к перевозке: система управления и нейросетевая модель // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2024. Т. 21. № 3. С. 670–685. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-670-685.
19. Сидоренко В.Г., Кулагин М.А., Родина Д.М. Интеллектуальная система обнаружения нарушений в соблюдении требований безопасности при работах на объектах железнодорожной инфраструктуры // Автоматика на транспорте. 2025. Т. 11. № 1. С. 55–65. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-55-65.
20. Формирование объективных показателей работы сортировочной станции на основе данных «от колеса» / А.Е. Хатламаджиян, И.А. Ольгейзер, А.В. Суханов, В.С. Иерусалимов // Автоматика на транспорте. 2024. Т. 10. № 3. С. 254–268. DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-03-254-268.
21. Лященко З.В., Игнатъева О.В., Шотт М.К. Оценка качества обслуживания пассажиров на железнодорожном транспорте на основе оценки эмоций пассажиров с использованием технологий искусственного интеллекта // Наука и техника транспорта. 2024. № 1. С. 58–66.
22. Использование методов машинного обучения для решения задачи энергооптимального движения поезда / С.Г. Истомин, К.И. Доманов, А.П. Шатохин [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2025. Т. 22. № 1. С. 75–84. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-75-84.
23. Иванова Н.В., Зобнин В.Д., Орлов В.В. Оптимизация маршрутов доставки с использованием методов искусственного интеллекта в условиях изменяющейся транспортно-логистической обстановки // Транспортное дело России. 2024. № 8. С. 139–144.
24. Канарский В.А. Исследование эффективности машинного обучения в мониторинге сигнальной точки // Надежность. 2023. № 1. С. 38–44. DOI: 10.21683/1729-2646-2023-23-1-38-44.
25. Прогнозирование рисков функционирования железнодорожной инфраструктуры с помощью искусственных нейронных сетей / А.В. Орлов, А.С. Алексеев, А.В. Истомин, Л. Бадирила // Международный научно-исследовательский журнал. 2025. № 3(153). DOI: 10.60797/IRJ.2025.153.35.
26. Малахов С.В., Капустин М.Ю. Метод построения адаптивного субоптимального стационарного регулятора движения поезда на основе искусственных нейронных сетей // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2021. Т. 80. № 1. С. 13–19. DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-1-13-19.
27. Булавин Ю.П., Игнатъева О.В. Обучение искусственных нейронных сетей с подкреплением // Автоматика, связь, информатика. 2024. № 11. С. 18–21. DOI: 10.62994/AT.2024.11.11.003.
28. Голочалов Н.С. Методы обучения с подкреплением в контексте моделирования беспилотного движения поездов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2025. № 3(67). С. 53–60. DOI: 10.20291/2079-0392-2025-3-53-60.
29. Сеначин Н.М. Оптимизация взаимодействия автономных железнодорожных систем на основе мультиагентного обучения // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2025. № 3(67). С. 100–105. DOI: 10.20291/2079-0392-2025-3-100-105.
30. Корнилов С.Н., Мишкурлов П.Н., Рахмангулов А.Н. Нейросетевая модель управления железнодорожной станцией // Академик Владимир Николаевич Образцов – основоположник транспортной науки : труды юбилейной международной научно-практической конференции. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2024. С. 295–301.
31. Zhang J., Zhang J. Artificial Intelligence Applied on Traffic Planning and Management for Rail Transport: A Review and Perspective // Discrete Dynamics in Nature and Society. 2023. Vol. 2023. P. 1832501. DOI: 10.1155/2023/1832501.
32. A review of artificial intelligence applications in high-speed railway systems / X. Li, M. Zhu, B. Zhang [et al.] // High-speed Railway. 2024. Vol. 2. No. 1. P. 11–16. DOI: 10.1016/j.hspr.2024.01.002.
33. Artificial intelligence in rail transit wireless communication systems: Status, challenges and solutions / Ju. Zhao, Xu. Gao, Zh. Wu [et al.] // Physical Communication. 2024. Vol. 67. P. 102484. DOI: 10.1016/j.phycom.2024.102484.
34. Tang R., Liu R., Lin Zh. Predicting primary delay of train services using graph-embedding based machine learning // Journal of Rail Transport Planning and Management. 2025. Vol. 34. P. 100518. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2025.100518.
35. Saki S., Soori M. Artificial intelligence, machine learning and deep learning in advanced transportation systems, a review // Multimodal Transportation. 2026. Vol. 5. No. 1. P. 100242. DOI: 10.1016/j.multra.2025.100242.
36. Arthaud F., Lecoœur G., Pierre A. Transformers à Grande Vitesse: Massively parallel real-time predictions of train delay propagation // Journal of Rail Transport Planning and Management. 2024. Vol. 29. P. 100418. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2023.100418.
37. Yue M., Ma Sh. LSTM-Based Transformer for Transfer Passenger Flow Forecasting between Transportation Integrated Hubs in Urban Agglomeration // Applied Sciences (Switzerland). 2023. Vol. 13. No. 1. P. 637. DOI: 10.3390/app13010637.
38. Hybrid LSTM-Transformer Models for Profiling Highway–Railway Grade Crossings / K. Chatterjee, J. Q. Li, F. Ansari [et al.] // Journal of Transportation Engineering Part A: Systems. 2026. Vol. 152. No. 2. P. 04025138. DOI: 10.1061/jtepbs.teeng-9135.
39. Popov P. A., Ozerov A. V., Marshova A. S. Prospects of autonomous railway transport development // BRICS Transport. 2024. Vol. 3. No. 3. DOI: 10.46684/2024.3.4.
40. Никищенко С.А., Гаранин А.В. Технология автоматизированной корректировки нормативных графиков движения поездов с применением программных роботов // Автоматика на транспорте. 2024. Т. 10. № 1. С. 18–31. DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-01-18-31.
41. The genetic algorithm based on generative adversarial network for dynamic multi-objective optimization problem and application / T. Zhang, H. Yi, Z. Tai [et al.] // Knowledge-Based Systems. 2026. Vol. 332. P. 114939. DOI: 10.1016/j.knosys.2025.114939.

References

1. PNST 884-2023 Artificial intelligence in the railway industry. Use cases. Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. Available at: <https://www.rst.gov.ru>. (Accessed on March 29, 2026).

2. White Paper. Artificial Intelligence in Transport and Logistics: Industry Document. Ministry of Transport of the Russian Federation. Available at: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/12167> (Accessed on March 29, 2026).
3. Register of Artificial Intelligence Technologies in the Transport Industry. Ministry of Transport of the Russian Federation. Available at: <https://mintrans.gov.ru> (Accessed on March 29, 2026).
4. Kiryakin V.Yu., Lobanov S.V. Prospects for using AI technologies to improve energy efficiency of predictive train schedules. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway Transport]. 2025;(11):4-12. (In Russ.)
5. Borodin A.F., Nikolaev K.Yu., Shinderov R.V., Prozorov V. V. Organization of car flows: conditions, limitations, digital solutions. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway Transport]. 2025;(6):11-19. (In Russ.)
6. Osminin A.T., Baushev A.N., Osminina I.I., Shatokhin A.A. On the possibility of applying artificial intelligence in the management of railway transport systems and the transportation process. *Innovatsionnye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte. Sbornik trudov nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Innovative Technologies in Railway Transport. Proceedings of the Scientific and Practical Conference with International Participation]. Moscow: Russian University of Transport, 2022, pp. 332-343. (In Russ.)
7. Chebotareva E.A. Development of reserve assessment tools the capacity of railway sections based on the creation of a digital twin and the use of an artificial neural network. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin* [World of transport and technological machines]. 2024;(3-2(86)):126-131. (In Russ.). DOI: 10.33979/2073-7432-2024-3-2(86)-126-131.
8. Tretyakov G.M., Mazko N.N., Varlamov A.V. The use of machine learning technologies to automate the planning and management of freight transportation on the railway. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high technologies]. 2024;(4):88-100. (In Russ.). DOI: 10.17513/snt.39977.
9. Bushuev S.V., Golochalov N. S. Train movement simulation based on the application of statistical data. *Innovatsionnyi transport* [Innovative transport]. 2024;(1(51)):52-57. (In Russ.). DOI: 10.20291/2311-164X-2024-1-52-57.
10. Kulagin M.A., Sidorenko V.G. Decision support for preventing safety violations. *Nadezhnost* [Reliability]. 2021;21(4):38-46. (In Russ.). DOI: 10.21683/1729-2646-2021-21-4-38-46.
11. Larin E.S. Forecasting the energy costs of rolling stock using machine learning algorithms. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin* [Dynamics of systems, mechanisms and machines]. 2024;12(3):130-134. (In Russ.). DOI: 10.25206/2310-9793-2024-12-3-130-134.
12. Obukhov A.D. Neural network control of marshalling processes. *Mir transporta* [World of transport]. 2016;14(1(62)):138-147. (In Russ.)
13. Kazakov A.L., Upyr R.Yu., Domozhirova A.D. Neuronal network approach to study the operation of shuttle-service trains. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport]. 2023;82(2):158-167. (In Russ.). DOI: 10.21780/2223-9731-2023-82-2-158-167.
14. Kovalev K.E., Novichikhin A.V. The procedure for planning the operation of low-intensity railway lines: logistical aspects and neural network models. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2023;20(2):325-335. (In Russ.). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-325-335.
15. Zhuravleva N.A., Batalova N.V. Calculation algorithm of the expected passenger flow of innovative railway transport based on a neural model. *Innovatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii* [Innovative transport systems and technologies]. 2025;11(3):474-485. (In Russ.). DOI: 10.17816/transsyst688684.
16. Domanov K.I., Istomin S.G., Shatokhin A.P. Approaches to Creating a Driver Decision Support System for Digital Analysis of Railway Infrastructure Based on Machine Learning and Machine Vision Algorithms. *E3S Web of Conferences. Proceedings of the 2nd International Conference on High-Speed Transport Development (HSTD 2023). Les Ulis, EDP Sciences - Web of Conferences*. 2023; 05001. DOI: 10.1051/e3sconf/202344605001.
17. Lyubchenko A.A., Smolin I.Yu. Features of the algorithm for recognising car number from the image. *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, Communication, Informatics]. 2024;(4):7-9. (In Russ.). DOI: 10.34649/AT.2024.4.4.002.
18. Smirnov F.A., Novichikhin A.V. Automation of acceptance of wagons for transportation: control system and neural network model. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2024;21(3):670-685. (In Russ.). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-670-685.
19. Sidorenko V.G., Kulagin M.A., Rodina D.M. Intelligent system detecting safety requirements violation in railway infrastructure maintenance. *Avtomatika na transporte* [Automation on transport]. 2025;11(1):55-65. (In Russ.). DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-55-65.
20. Khatlamadzhian A.E., Olgeizer I.A., Sukhanov A.V., Ierusalimov V.S. Formation of objective indicators of marshalling yard performance based on data «from the wheel». *Avtomatika na transporte* [Automation on transport]. 2024;10(3):254-268. (In Russ.). DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-03-254-268.
21. Lyashchenko Z. V., Ignatieva O. V., Schott M. K. Assessment of passenger service quality in railway transport based on passenger emotion assessment using artificial intelligence technologies. *Nauka i tekhnika transporta* [Transport science and technology]. 2024;(1):58-66. (In Russ.)
22. Istomin S.G., Domanov K.I., Shatokhin A.P. et al. The use of machine learning methods to solve the problem of energy-efficient train movement. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2025;22(1):75-84. (In Russ.). DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-75-84.
23. Ivanova N.V., Zobnin V.D., Orlov V.V. Optimizing delivery routes using artificial intelligence in a changing transport environment. *Transportnoe delo Rossii* [Transport business of Russia]. 2024;(8):139-144. (In Russ.)
24. Kanarsky V.A. Research on the efficiency of machine learning in signal point monitoring. *Nadezhnost* [Reliability]. 2023;(1):38-44. (In Russ.). DOI: 10.21683/1729-2646-2023-23-1-38-44.

25. Orlov A.V., Alekseev A.S., Istomin A.V., Badirila L. Forecasting railway infrastructure operation risks using artificial neural networks. *Mezhdunarodniy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Scientific Research Journal]. 2025;(3(153)). (In Russ.). DOI: 10.60797/IRJ.2025.153.35.
26. Malakhov S.V., Kapustin M.Yu. Method for constructing an adaptive suboptimal stationary train traffic controller based on artificial neural networks. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport]. 2021;80(1):13-19. (In Russ.). DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-1-13-19.
27. Bulavin Yu.P., Ignatieva O.V. Reinforcement training in the task of managing the passage of trains through the site. *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, Communication, Informatics]. 2024;(11):18-21. (In Russ.). DOI: 10.62994/AT.2024.11.11.003.
28. Golochalov N.S. Reinforcement learning methods in the context of simulation of unmanned train movement. *Vestnik Uralskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State University of Railway Transport]. 2025;(3(67)):53-60. (In Russ.). DOI: 10.20291/2079-0392-2025-3-53-60.
29. Senachin N.M. Optimizing the interaction of autonomous railway systems based on multi-agent learning. *Vestnik Uralskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State University of Railway Transport]. 2025;(3(67)):100-105. DOI: 10.20291/2079-0392-2025-3-100-105. (In Russ.)
30. Kornilov S.N., Mishkurov P.N., Rakhmangulov A.N. Neural network model for railway station management. *Akademik Vladimir Nikolaevich Obratsov – osnovopolozhnik transportnoy nauki. Trudy yubileinoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Academician Vladimir Nikolaevich Obratsov, founder of transport science. Proceedings of the Anniversary International Scientific and Practical Conference]. Kursk, Universitetskaya kniga, 2024, pp. 295-301. (In Russ.)
31. Zhang J., Zhang J. Artificial Intelligence Applied on Traffic Planning and Management for Rail Transport: A Review and Perspective. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2023;2023:1832501. DOI: 10.1155/2023/1832501.
32. X. Li, M. Zhu, B. Zhang et al. A review of artificial intelligence applications in high-speed railway systems. *High-speed Railway*. 2024;2(1):11-16. DOI: 10.1016/j.hspr.2024.01.002.
33. Ju. Zhao, Xu. Gao, Zh. Wu et al. Artificial intelligence in rail transit wireless communication systems: Status, challenges and solutions. *Physical Communication*. 2024;67:102484. DOI: 10.1016/j.phycom.2024.102484.
34. Tang R., Liu R., Lin Zh. Predicting primary delay of train services using graph-embedding based machine learning. *Journal of Rail Transport Planning and Management*. 2025;34:100518. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2025.100518.
35. Saki S., Soori M. Artificial intelligence, machine learning and deep learning in advanced transportation systems, a review. *Multimodal Transportation*. 2026;5(1):100242. DOI: 10.1016/j.multra.2025.100242.
36. Arthaud F., Lecoeur G., Pierre A. Transformers à Grande Vitesse: Massively parallel real-time predictions of train delay propagation. *Journal of Rail Transport Planning and Management*. 2024;29:100418. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2023.100418.
37. Yue M., Ma Sh. LSTM-Based Transformer for Transfer Passenger Flow Forecasting between Transportation Integrated Hubs in Urban Agglomeration. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023;13(1):637. DOI: 10.3390/app13010637.
38. Chatterjee K., Li J.Q., Ansari F. et al. Hybrid LSTM-Transformer Models for Profiling Highway–Railway Grade Crossings. *Journal of Transportation Engineering Part A: Systems*. 2026;152(2):04025138. DOI: 10.1061/jtepbs.teeng-9135.
39. Popov P.A., Ozerov A.V., Marshova A.S. Prospects of autonomous railway transport development. *BRICS Transport*. 2024;3(3). DOI: 10.46684/2024.3.4.
40. Nikishchenkov S.A., Garanin A.V. Automated adjustment technology standard train schedules using software robots. *Avtomatika na transporte* [Automation on Transport]. 2024;10(1):18-31. (In Russ.). DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-01-18-31.
41. Zhang T., Yi H., Tai Z. et al. The genetic algorithm based on generative adversarial network for dynamic multi-objective optimization problem and application. *Knowledge-Based Systems*. 2026;332:114939. DOI: 10.1016/j.knsys.2025.114939.

Поступила 28.04.2026; принята к публикации 19.07.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 28/04/2026; revised 19/07/2026; published 30/09/2026

Бессоненко Сергей Анатольевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Управление эксплуатационной работой», Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия.
Email: bessonenko@stu.ru. ORCID 0000-0001-5782-1596

Осипов Николай Игоревич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой», Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия.
Email: N-I-Osipov@yandex.ru. ORCID 0000-0002-3278-6330

Sergey A. Bessonenko – DrSc (Eng.), Associate Professor, Chief of Operations Management Department, Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia.
Email: bessonenko@stu.ru. ORCID 0000-0001-5782-1596

Nikolay I. Osipov – PhD (Eng.), Associate Professor of Operations Management Department, Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia.
Email: N-I-Osipov@yandex.ru. ORCID 0000-0002-3278-6330