

ISSN (Print) 2073-6185

ISSN (On-line) 2542-095X

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Дагестанский государственный технический университет»**



Том 53, № 1, 2026.

ВЕСТНИК

**ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Volume 53, No.1, 2026.

HERALD

**OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY.
TECHNICAL SCIENCES**

Журнал основан в 1997 году.

Выходит 4 раза в год

Научно-исследовательский журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР), свидетельство ПИ № ФС77-30186 от 9 ноября 2007г.

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (Категория 2). Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), доступный в интернете, по адресу <http://www.elibrary.ru> (Научная электронная библиотека). Журнал включен Единый государственный перечень научных изданий (Белый список. Категория 3). Журнал зарегистрирован в Российском центре научной информации (РЦНИ).

Журнал включен в российские и международные открытые репозитории научной информации; подключен к международной системе библиографических ссылок и находится в директории журналов открытого доступа: CrossRef; Google Scholar; Dimensions; Ulrich's Periodicals Directory; Open Archives; Research Bible; Directory of Open Access Journals (DOAJ); ROAD, Research4Life; LENS.ORG; OpenAIRE; Соционет, КиберЛенинка, Microsoft Academic, Mendeley, Unpaywall.

© Учредитель и издатель ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», 2026.

The research journal is registered in Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications (ROSKOMNADZOR), the certificate of PI No. FS77-30186 of November 9, 2007.

The journal is included in the List of leading reviewed scientific journals and periodicals of the Higher Certifying Commission (VAK) of the Russian Federation, in which basic scientific results of dissertations are to be published (Category 2).

The journal is included in the Russian Index of Scientific Citing (RISC) available on the Internet (<http://www.elibrary.ru> Scientific electronic library). The journal is included in the Unified State List of Scientific Publications (White List. Category 3). The journal is registered with the Russian Center for Scientific Information (RCSI).

The journal is included in the Russian Citing Systems (RCS) and in the open repositories of scientific information connected with international system of bibliographic references: Cross Ref; Google Scholar; Dimensions; Ulrich's Periodicals Directory; Open Archives; Research Bible; Directory of Open Access Journals (DOAJ); ROAD; Research4Life; LENS.ORG; OpenAIRE; Socionet; CyberLeninka, Microsoft Academic, Mendeley, Unpaywall.

© Founder and Publisher Daghestan State Technical University, 2026.



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Дагестанский государственный технический университет»

ВЕСТНИК ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ.
ТОМ 53, № 1, 2026

Главный редактор: Алиев Р.М., д.т.н., профессор Дагестанского государственного технического университета, Махачкала, РФ.
<https://orcid.org/0000-0002-3061-4121>

Заместитель главного редактора: Эсетова А.М., д.э.н., профессор Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, РФ. <https://orcid.org/0000-0003-1093-5507>. Scopus ID:57189098846.

Редакционная коллегия:

Научная рубрика «Энергетика и электротехника»

Ответственный редактор: Евдулов О.В., д.т.н., доцент Дагестанского государственного университета, г. Махачкала, РФ.

Ахмедов Г.Я., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Дагестанского государственного технического университета, Махачкала, РФ.

Иванов А.П., д.ф.-м.н., профессор, зав. каф. Московского физико-технического института (государственного университета), г. Долгопрудный, РФ.

Каргин Н.И., д.т.н., профессор, проректор, зам. директора Института функциональной ядерной электроники Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Москва, РФ.

Кобзаренко Д.Н., д.т.н., профессор Объединенного института высоких температур РАН, г. Москва, РФ.

Кругляков А.А., д.т.н., профессор, ген. директор научно-коммерческой фирмы WBN, г. Берлин, Германия.

Кутузов В.М., д.т.н., профессор, президент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), г. Санкт-Петербург, РФ.

Магомедов М. Х., д-р.физ.-мат. наук, генеральный директор ООО «САУНО», НПФ, г. Москва, РФ.

Сафаралиев Г.К., д.ф.-м.н., член-корр. РАН, научный руководитель НИИ «Микроэлектроники и нанотехнологий» Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, РФ.

Сулин А.Б., д.т.н., профессор, член-корр. МАХ, НИИ промышленной и морской медицины федерального медико-биологического агентства, г. Санкт-Петербург, РФ. AuthorID (Scopus): 6507491881

Научная рубрика «Информационные технологии и телекоммуникации»

Ответственный редактор: Громов Ю.Ю., д.т.н., профессор, директор института автоматизации и информационных технологий Тамбовского государственного технического университета, г. Тамбов, РФ.

Баширов М.М., д.т.н., профессор Азербайджанского государственного технического университета, г. Баку, Азербайджанская республика.

Ларионов А.Н., д.э.н., профессор, генеральный директор ООО «Научно-исследовательский центр «Стратегия», г. Москва, РФ.

Лобанов И.Е., д.т.н., ведущий научный сотрудник Московского авиационного института (Национальный исследовательский университет), г. Москва, РФ. <https://orcid.org/0000-0001-8421-0248>

Маркосян М.В., д.т.н., профессор, директор ЗАО «Ереванский НИИ средств связи», г. Ереван, Армения.

Мустафаев А.Г., д.т.н., профессор Дагестанского государственного университета народного хозяйства, Махачкала, РФ.

Рогозин Е.А., д.т.н., профессор Воронежского института Министерства внутренних дел России, г.Воронеж, РФ.

Саркаров Т.Э., д.т.н., профессор Дагестанского государственного технического университета, г.Махачкала, РФ.

Финаев В.И., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, РФ;

Хачумов В.М., д.т.н., профессор, заведующий лабораторией Института системного анализа РАН, г.Москва, РФ

Шахтарин Б.И., д.т.н., профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, г. Москва, РФ.

Якунин А.Г., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, РФ.

Научная рубрика «Строительство и архитектура»

Ответственный редактор: Хаджишалапов Г.Н., д.т.н., профессор Дагестанского государственного технического университета, Махачкала, РФ.

Давидюк А.Н., д.т.н., засл. строитель России, директор НИИЖБ им. А.А.Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», г. Москва, РФ.

Казачек В.Г., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Института жилища - НИПТИС им. Атаева С.С., директор ООО «Мобильная диагностика в строительстве», г. Минск, Республика Беларусь.

Мажиев Х.Н., д.т.н., профессор Грозненского государственного нефтяного технического университета им. академика М.Д. Миллионщикова, г. Грозный, РФ.

Несветаев Г.В., д.т.н., профессор, зав. каф. Донского государственного технического университета, г. Ростов-на-Дону, РФ.

Чепурненко А.С., д.т.н., профессор Донского государственного технического университета, г Ростов-на-Дону, РФ.

Языев Б.М., д.т.н., советник РААСН, профессор Донского государственного технического университета, г. Ростов-на-Дону, РФ.

Редакционный совет:

Председатель редакционного совета:

Якимович Б.А., д.т.н., профессор, Севастопольский государственный университет | Институт ядерной энергии и промышленности, г. Севастополь, РФ. orcid.org/0000-0001-7363-1071

Сопредседатели:

Иванов К.М., д.т.н., профессор, ректор БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ.

Кутузов В.М., д.т.н., профессор, президент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), г. Санкт-Петербург, РФ.

Члены редакционного совета:

Бабанлы М.Б.-О., д.т.н., профессор, ректор Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности, г. Баку, Азербайджанская республика.

Джанзаков И.И., д.т.н., профессор, член-корр. НИА РК, академик МАНЭБ, г. Атырау, Республика Казахстан.

Тимошин С.И., д.ф.-м.н., академик Белорусской инженерной академии, профессор, ректор Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого, г. Гомель, Республика Беларусь.

Группы научных специальностей

2.4.8. Машины

и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники (технические науки)

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки)

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)

2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки)

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)

2.3.6. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки)

2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования (технические науки)

2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки),

2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки),

2.1.9. Строительная механика (технические науки).

Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки.

Том 53, № 1

Махачкала, 2026. 261 с.

Издается

по решению Ученого Совета ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет»

Адрес учредителя

и издателя

367015, РД, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70,

ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет».

Тел./факс (8722)623715;

(8722)623964

e-mail: vestnik.dgtu@mail.ru

Website:

<http://vestnik.dgtu.ru/>

СОДЕРЖАНИЕ

Энергетика и электротехника	6
О.В. Евдулов, А.М. Кардашев, Г.Г. Магомедов, М.А. Хазамова. Перспективы использования охлаждающих термоэлектрических устройств для лечения радиоиндуцированного орофарингеального синдрома	6
И.Е. Лобанов. Моделирование течения и теплоотдачи в трубах с турбулизаторами для перспективных теплообменников при больших и очень больших (от миллиона до миллиарда) критериях Рейнольдса	15
Информационные технологии и телекоммуникации	23
В.Ю. Баканин. От CAD к АСУП: сценарный подход к автоматизации исполнительной документации в строительстве	23
С.С. Васичкин. Классификация линий связи и аппаратных средств как основа для выявления несанкционированных подключений	40
С.В. Гужов, А.А. Арбатский, Е.В. Крылова, Д.З. Дзахмишева. Применение искусственной нейронной сети для повышения точности настроек регуляторов ИТП на примере зданий высшей школы	49
А.С. Дулесов, Д.Б. Байыр, И.А. Бычкова. Энтропия А. Реньи как обобщение базовых процессов	56
О. Ефимов, Е.А. Рогозин. Оптимизационные задачи, связанные с количественной оценкой уровня защищенности, на основе анализа уязвимостей автоматизированных систем	64
Т.И. Исабекова. Математическая реинженерия ИТ-систем в обучении системному программированию: модель оценки инженерной зрелости студенческого проекта	73
И.В. Карпасюк, А.И. Карпасюк. Матричная модель определения уровня кибервиктимности	86
А.Е. Козлова, О.С. Логунова, М.Ю. Наркевич. Модель оптимальной траектории полёта беспилотного летательного аппарата при фронтальном обследовании промышленных зданий	96
И.И. Лившиц. Оценка влияния рисков на безопасность систем искусственного интеллекта	108
Л.И. Литвиненко, Л.А. Коробова, И.С. Толстова. Определение зависимостей API специализированного программного обеспечения при максимально возможной нагрузке без существенной деградации системы	116
И.В. Лобачев, А.Л. Масленников. Упрощённая математическая модель динамики беспилотного транспортного средства с двумя поворотными осями	123
И.А. Лоскутов, В.А. Репенко. Модернизация системы обеспечения информационной безопасности ситуационного центра, являющегося объектом критической информационной инфраструктуры	139
С.И. Носков, А.П. Медведев. Оценивание параметров однородной вложенной кусочно-линейной регрессии второго типа со вторым порядком вложенности	151
Д.А. Потенко, Д.С. Чмыхало, О.Л. Легонько. Технологии искусственного интеллекта в решении задач информационной безопасности	157
С.В. Разумников. Оптимизационная сетевая модель нахождения максимального потока сети при управлении облачными ресурсами	170
В.Р. Четвертухин. Математическая модель микросервисной системы на основе байесовской сети для задачи оптимизации конфигурации с учётом каскадных зависимостей	186
А.И. Янгиров, Е.А. Рогозин, И.В. Атласов, С.Б. Ахлюстин. Распределение ресурсов защиты автоматизированных систем органов внутренних дел Российской Федерации и их реализация	193
Строительство и архитектура	200
С.Х. Аль-Згуль, Т.Н. Кондратьева, Б.М. Языев, А.С. Чепурненко. Гибридная методология прогнозирования несущей способности внецентренно сжатых прямоугольных трубобетонных колонн	200
Е.В. Корнеева, В.А. Корнеев. Использование горелых пород в строительных технологиях	214
Е.А. Лукаш, В.А. Гричаников, В.Г. Рогуленко, Е.В. Донцова. Прочностные свойства обработанных неорганическим вяжущим щебеночно-песчаных смесей с использованием ускорителей твердения комплексного действия	224
Г.В. Несветаев, А.В. Коллеганов, Н.А. Коллеганов, А.Н. Ивлев, А.М. Омаров. Анализ напряженно-деформированного состояния эксплуатируемых железобетонных конструкций с использованием ультразвука	233
Б.Д. Тотурбиев, М.М. Журавлев, А.А. Тотурбиев. Исследование влияния методов получения полисиликатов натрия, силикатного модуля и концентрации связующего на адгезию композиционного вяжущего	242
А.А. Фролова, Д.Ф. Карпов, Х.М. Вафаева, А.С. Воронов. Исследование теплового режима в классе общеобразовательной школы при различных вариантах тепловой защиты наружной стены	252
Требования к оформлению статей	260

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Daghestan State Technical University» HERALD OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES. V o l u m e 5 3 , N o . 1 , 2 0 2 6 .	
Editor-in-Chief: Rasul M. Aliev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; https://orcid.org/0000-0002-3061-4121 Deputy Editor: Aida M. Esetova, Dr. Sci. (Econom.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; https://orcid.org/0000-0003-1093-5507 Editorial Board: Scientific rubric «Energy and Electrical Engineering» Executive editor: Oleg V. Evdulov, Dr. Sci. (Eng.), Aassoc. Professor, Daghestan State University, Makhachkala, Russia; Ganapi J. Akhmedov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Alexander P. Ivanov, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia; Nicholay I. Kargin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice Rector, Deputy Director of the Institute for Functional Nuclear Electronics, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia; Dmitry N. Kobzareno, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Joint Institute of High Temperatures RAS, Moscow, Russia; Alexander A. Krugljakov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, General Director Wissenschaftliche Beratung und Handelsvertretung, Germany; Vladimir M. Kutuzov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia; Magomed Kh. Magomedov, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), General Director, "SAUNO" Ltd. Moscow, Russia; Gadzhimet K. Safaraliyev, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Professor, Scientific Director of the «Microelectronics and Nanotechnology» Research Institute, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Alexander B. Sulin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding member, MAX, Institute of Industrial and Marine Medicine of Federal Medical and Biological Agency, St. Petersburg, Russia; Scientific rubric «Information Technology and Telecommunications» Executive editor: Gromov Yu.Yu., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Institute of Automation and Information Technologies, Tambov State Technical University, Tambov, Russia; Mahir M. Bashirov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan; Arkady N. Larionov, Dr. Sci. (Economics), Professor, General Director LLC Research Center «Strategy», Moscow, Russia Igor E. Lobanov, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; Mher V. Markosyan, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of Yerevan Research Institute of Communication Facilities, Yerevan, Republic of Armenia; Aslan G. Mustafayev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Dagestan State University of National Economy, Makhachkala, Russia. Eugene A. Rogozin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia, Voronezh, Russia; Tazhudin E. Sarkarov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Boris I. Shakhhtar, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia Valery I. Finayev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia; Vyacheslav M. Khachumov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of laboratory, Institute for Systems Analysis of RAS, Moscow, Russia; Alexey G. Yakunin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia. Scientific rubric «Building and architecture» Executive editor: Gadzhimurad N.Khadzhishalopov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Alexey N. Davidyuk, Dr. Sci. (Eng.), Honored Builder of Russia, Director, Gvozdev NIIZHB, JSC «SIC Construction», Moscow, Russia; Vladimir G. Kazachek, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Senior researcher, Ataev Institute of Dwelling - NIPTIS Director of Mobile diagnostics in construction, Minsk, Republic of Belarus; Khasan N. Mazhiev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia; Gregory V. Nesvetaev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Construction Technologies Department, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia; Anton S. Chepumenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia. Batyr M. Yazyev, Dr. Sci. (Eng.), Advisor to RAASN, Professor of Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia. Editorial council Chairman of the editorial council: Boris A.Yakimovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Sevastopol State University, Institute of Nuclear Energy and Industry, Sevastopo, Russia. The co-chairs of the editorial council: Konstantin M. Ivanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMECH», Saint-Petersburg, Russia; Vladimir M. Kutuzov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia; Members of the Editorial Board: Mustafa B.-O. Babanly, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan; Islam I. Djanzakov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding member, SRA RK, Academician of MANEB, Atyrau, Republic of Kazakhstan; Sergey I. Timoshin, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Professor, Rector, Sukhoi Gomel State Technical University, Gomel, Republic of Belarus;	Research areas 2.4.8. Machines and devices, processes of refrigeration and cryogenic equipment (Technical Sciences), 2.3.1. System analysis, management and information processing (Technical Sciences), 2.3.3. Automation and management of technological processes and production (Technical Sciences), 2.3.4. Management in organizational systems (Technical Sciences), 1.2.2. Mathematical modeling, numerical methods and program complexes (Technical Sciences), 2.3.6. Methods and systems for information security, information security (Technical Sciences), 2.3.7. Computer modeling and design automation (Technical sciences) 2.1.3. Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (Technical Sciences), 2.1.5. Building materials and products (Technical Sciences), 2.1.9. Construction mechanics (Technical Sciences), Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. Vol. 53, No.1 Makhachkala, 2026–261 p. Published by Decision of the Academic Council Daghestan State Technical University Edition and Publisher Address: 70 I. Shamil Ave., Makhachkala, the Republic of Daghestan 367015, Russia. Daghestan State Technical University Tel./fax (8722)623715 (8722)623964

CONTENTS

Energy and Electrical Engineering	6
O.V. Evdulov, A.M. Kardashev, G.G. Magomedov, M.A. Khazamova. Prospects for the Use of Thermoelectric Cooling Devices for the Treatment of Radiation-Induced Oropharyngeal Syndrome	6
I.E.Lobanov. Modeling flow and heat transfer in pipes with turbulators for advanced heat exchangers with high and very high (from a million to a billion) Reynolds numbers	15
Information Technology and Telecommunications	23
V.Yu. Bakanin. From CAD to Automated Control System: a Scenario Approach to Automation of Executive Documentation in Construction	23
S.S.Vasichkin. Classification of communication lines and hardware devices as a basis for Detecting Unauthorized Connections	40
S. V. Guzhov, A. A. Arbatsky, E.V. Krylova, D. Z. Dzakhmisheva. Using an artificial neural network to improve the accuracy of IHP controller settings using the example of higher education buildings	49
A.S. Dulesov, D.B. Bayir, I.A. Bychkova. A. Renyi's Entropy as a generalization of Basic Processes.....	56
A.O. Efimov, E.A. Rogozin. Optimization tasks related to quantifying the security level based on vulnerability analysis of automated systems	64
T.I. Isabekova. Mathematical Reengineering of IT Systems in System Programming Education: The Model for Assessing the Engineering Maturity of a Student Project.....	73
I.V. Karpasyuk, A.I. Karpasyuk. Matrix model for determining the level of cybervictimization	86
A.E. Kozlova, O.S. Logunova, M.Yu. Narkevich. The model of the optimal flight path of an unmanned aerial aircraft during a frontal survey of industrial buildings	96
I.I. Livshits. Assessing the impact of risks on the security of Artificial Intelligence systems.....	108
L.I. Litvinenko, L.A. Korobova, I.S. Tolstova. Determination of specialized software API dependencies under maximum possible load without significant system degradation	116
I.V. Lobachev, A.L. Maslennikov. Simplified mathematical model of the dynamics of an unmanned vehicle with two steering axes	123
I.A. Loskutov, V.A. Repenko. Modernization of the information security system of the situational center, which is a critical information infrastructure facility	139
S.I. Noskov, A.P. Medvedev. Estimation of parameters of homogeneous nested bilinear regression of the second type with the second order of nesting	151
D.A.Potienko, D.S.Chmykhalo, O.L.Legonko. Artificial Intelligence Technologies in Solving Information Security Problems.....	157
S.V. Razumnikov. Optimization network model for finding the maximum network flow in cloud resource management	170
V.R. Chetvertukhin. Mathematical model of a microservice system based on a Bayesian network for the task of optimizing configuration taking into account cascading dependencies	186
A.I. Yangirov, E.A. Rogozin, S.B. Akhlyustin. Allocation of resources for the protection of automated systems of the internal affairs bodies of the Russian Federation and their implementation.....	193
Building and Architecture	200
S.Kh. Al-Zgul, T.N. Kondratieva, B.M. Yazyev, A.S. Chepurnenko. A hybrid methodology for predicting the load-bearing capacity of rectangular concrete-filled steel tube columns under eccentric compression	200
E.V. Korneeva, V.A. Korneev. Use of burnt rocks in construction technologies.....	214
E.A. Lukash, V.A. Grichanikov, V.G. Rogulenko, E.V. Dontsova. Strength properties of crushed stone-sand mixtures treated with inorganic binders using complex hardening accelerators	224
G.V. Nesvetaev, A.V. Kolleganov, N.A. Kolleganov, A.N. Ivlev, A.M. Omarov. Analysis of the Stress-Strain State of operated reinforced concrete structures using ultrasound	233
B.D. Toturbiev, M.M. Zhuravlev, A.A. Toturbiev. Study of the influence of sodium polysilicate production methods, silicate modulus, and binder concentration on the adhesion of composite binders	242
A.A. Frolova, D.F. Karpov, Kh.M. Vafaeva, A.S. Voronov. A Study of the thermal regime in a comprehensive school classroom with different options for thermal protection of the external wall.....	252
Formatting requirements for papers	260

**Перспективы использования охлаждающих термоэлектрических устройств
для лечения радиоиндуцированного орофарингеального синдрома
О.В. Евдулов^{1,2}, А.М. Кардашев³, Г.Г. Магомедов¹, М.А. Хазамова¹**

¹Дагестанский государственный технический университет,

¹367015, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия,

²Дагестанский государственный университет,

²367000, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева 43-а, Россия,

³Республиканский онкологический центр,

³367008, г. Махачкала, ул. Г. Гаджиева 24, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка охлаждающего термоэлектрического устройства (ТЭУ) для лечения радиоиндуцированного орофарингеального синдрома путем локальной гипотермии. **Метод.** Исследование основано на методах термодинамического анализа, натурного и вычислительного моделирования объектов криогенной техники с целью обеспечения надежности, экологичности, бесшумности, функциональности и компактности. **Результат.** Разработано ТЭУ, в состав которого помимо источника холода в виде стандартных термоэлектрических модулей (ТЭМ), входят мундштук, транспортная система и система для отвода тепла от горячих спаев ТЭМ. На основе расчетов в программном комплексе определен тип ТЭМ, используемый в ТЭУ. Получены зависимости, описывающие основные характеристики ТЭУ и ТЭМ, входящих в его состав. Построены графики зависимости: изменение холодопроизводительности ТЭМ, холодильного коэффициента, напряжения питания от перепада температур между спаями термоэлементов для различных значений силы тока питания; зависимость напряжения на ТЭМ от величины тока питания при различных значениях перепада температур между спаями термоэлементов, а также зависимость холодильного коэффициента ТЭМ от тока питания. Графики представлены при температуре 47°C горячих спаев термоэлементов, входящих в ТЭМ. **Вывод.** Определены параметры ТЭУ: количество ТЭМ типа DRIFT-1,2 – 2 шт., рабочий диапазон холодопроизводительностей единичного ТЭМ - от 37 до 70 Вт при среднем перепаде температур между спаями 35 К, ток питания - от 4,8 до 8,2 А при потребляемой мощности от 90 до 300 Вт, холодильный коэффициент - от 0,2 до 0,6.

Ключевые слова: локальная гипотермия, термоэлектрическое устройство, термоэлектрический модуль, холодопроизводительность, температура, конструкция

Для цитирования: О.В. Евдулов, А.М. Кардашев, Г.Г. Магомедов, М.А. Хазамова. Перспективы использования охлаждающих термоэлектрических устройств для лечения радиоиндуцированного орофарингеального синдрома. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(1):6-14. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-6-14.

**Prospects for the Use of Thermoelectric Cooling Devices for the Treatment
of Radiation-Induced Oropharyngeal Syndrome**

O.V. Evdulov^{1,2}, A.M. Kardashev³, G.G. Magomedov¹, M.A. Khazamova¹

¹Daghestan State Technical University,

¹70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367015, Russia,

²Daghestan State Technical University,

²43-a M. Gadzhiev St., Makhachkala 367000, Russia,

³Republican Oncology Center,

³24 G. Gadzhiev St., Makhachkala 367008, Russia

Abstract. Objective. The aim of this study is to develop a cooling thermoelectric device (CTED) for the treatment of radiation-induced oropharyngeal syndrome through local hypothermia. **Method.** The study is based on thermodynamic analysis, in-kind modeling, and computational modeling of cryogenic equipment to ensure the reliability, environmental friendliness, quiet operation, functionality, and compactness of the CTED. **Result.** The CTED was developed, which, in addition to a cold source in the form of standard thermoelectric modules (TEMs), includes a mouthpiece, a transport system, and a system for removing heat from the hot junctions of the TEMs. Based on calculations in the software package, the type of TEM used in the CTED was determined. Dependencies describing the main characteristics of the CTED and the TEMs comprising it were obtained. The following graphs were plotted: the change in the refrigeration capacity of the thermoelectric module, the coefficient of performance, and the supply voltage as a function of the temperature difference between the junctions of the thermocouples for various values of the supply current; the dependence of the voltage on the thermoelectric module on the supply current for various values of the temperature difference between the junctions of the thermocouples; and the dependence of the coefficient of performance of the thermoelectric module on the supply current. The graphs are presented at a temperature of 47°C at the hot junctions of the thermocouples included in the thermoelectric module. **Conclusion.** The following parameters of the thermoelectric module were determined: the number of DRIFT-1.2 thermoelectric modules is 2 pcs., the operating range of the refrigeration capacity of a single thermoelectric module is from 37 to 70 W with an average temperature difference between the junctions of 35 K, the supply current is from 4.8 to 8.2 A with a power consumption of 90 to 300 W, the coefficient of performance is from 0.2 to 0.6.

Keywords: local hypothermia, thermoelectric device, thermoelectric module, cooling capacity, temperature, design

For citation: O.V. Evdulov, A.M. Kardashev, G.G. Magomedov, M.A. Khazamova. Prospects for the Use of Thermoelectric Cooling Devices for the Treatment of Radiation-Induced Oropharyngeal Syndrome. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):6-14. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-6-14.

Введение. Радиоиндуцированный орофарингеальный синдром или орофарингеальный мукозит - комплекс симптомов, функциональных и органических изменений слизистой полости рта, носоглотки, ротоглотки и слюнных желез, связанный с непосредственным терапевтическим воздействием ионизирующего излучения в самостоятельном варианте или совместно с химиотерапией, проявляющийся в виде полиморфной клинической картины: десквамации, эрозии и воспаления слизистых с образованием язв, болевого синдрома, тризма (спазма жевательной мускулатуры), дисгевзии (извращения вкусового ощущения) и гипогевзии (снижение остроты вкусового ощущения), сиалоаденита (воспаления слюнных желез) с возможным присоединением бактериальной и грибковой инфекции. Радиоиндуцированный орофарингеальный синдром - наиболее частое осложнение лучевой терапии опухолей головы и шеи [1-5].

Мукозит полости рта является частым и потенциально серьезным осложнением терапии онкологических заболеваний. Следовательно, лечение мукозита часто приводит к ограничению подводимой суммарной очаговой дозы и увеличению продолжительности пребывания в стационаре пациентов и связанных с этим расходов. Формирование перерывов в лечении, либо прерывание лечения на дозах, не являющихся терапевтически радикальными, является значим фактором ответа на лечение и формирования радиорезистентности опухоли [4]. К числу факторов риска развития орофарингеального мукозита относятся локализация опухоли, доза облучения, режим фракционирования, а также индивидуальные особенности пациента. В наибольшей степени на риск развития мукозита и его течение влияет локализация злокачественной опухоли: полость рта, ротоглотка или носоглотка [6]. Наибольшим фактором, определяющим степень тяжести и увеличение частоты являются доза, тип и режим, сопутствующие облучению и химиотерапии [7].

Так, например, в ряде работ отмечается высокий риск развития мукозита у пациентов, получающих препараты цисплатина и цеткусимаба, являющихся основными лекарственными средствами, используемыми в схеме химио- и биолучевой терапии опухолей головы и шеи [8, 9].

При проведении химио- и биолучевой терапии важным является купирование их последствий, связанных с лечением радиоиндуцированного орофарингеального синдрома различными средствами.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является рассмотрение возможности применения охлаждающих термоэлектрических устройств (ТЭУ) для лечения радиоиндуцированного орофарингеального синдрома путем использования локальной гипотермии полости рта.

Методы исследования. Проведен обзор современной литературы, посвященной лечению орофарингеального мукозита у онкобольных, вызванного лучевой и химиотерапией, в частности, использованию локальной гипотермии полости рта. Согласно проведенным исследованиям определено, что мероприятия по профилактике и лечению радиоиндуцированного орофарингеального мукозита отражены в клинических рекомендациях, разработанных Группой по изучению мукозита Многонациональной ассоциации поддерживающей терапии при раке совместно с Международным обществом онкологии полости рта (Mucositis Study Group of the Multi-national Association for Supportive Care in Cancer and the International Society of Oral Oncology - MASCC/ISOO) [10].

Эти мероприятия включают: адекватное питание; купирование болевого синдрома, деконтаминацию флоры ротовой полости, профилактику сухости во рту, профилактическую гипотермию, терапевтическое использование палифермина, применение стимуляторов регенерации тканей, раневых покрытий, ополаскивателей полости рта. Начиная с XX века установлена высокая оздоровительная роль гипотермии в лечении радиоиндуцированных лучевых реакций при опухолях языка и губы при контактной лучевой терапии с радиевыми иглами и интрастатами.

На сегодняшний день локальная гипотермия в виде рассасывания кубиков льда и ледяной крошки применяется при комбинированной химиолучевой терапии и химиотерапии в самостоятельном варианте. Патогенетическое обоснование гипотермии – спазм сосудов ротовой полости вследствие охлаждения, провоцирующий локальную гипоксию (радио-защитное действие) и уменьшение всасывания слизистой внутривенно вводимого цитостатика (химиопрепарата), а также снижение объема мигрирующих в очаг лучевого повреждения провоспалительных медиаторов и факторов (цитокинов, хемокинов) вследствие вазоспазма [11-13]. При этом необходимо отметить, что применение льда, сформированного из загрязненной воды, является фактором контаминации слизистой полости рта вторичными бактериальными и грибковыми инфекциями, утяжеляющими течение орофарингеального мукозита, а также требующими добавления лекарственной терапии. Неправильно сформированная ледяная крошка может травмировать воспаленную слизистую острыми гранями. Внутриротовые охлаждающие устройства, которые на данный момент используются при орофарингеальном мукозите показывают лучший эффект и переносимость при гипотермии полости рта, чем использование льда и ледяной крошки.

Одним из примеров таких устройств является прибор, описанный в [14]. В его состав входит источник холода, выполненный в виде портативного жидкостного термостата, мундштук с гипоаллергенным покрытием, соединенный посредством транспортной системы, состоящей из двух гибких пластиковых шлангов, с жидкостным термостатом, средство для транспортировки охлажденной воды от жидкостного термостата до мундштука. При проведении процедур мундштук помещается в ротовую полость пациента, а вода, охлажденная внутри термостата до 8-10° С посредством парокомпрессионной охлаждающей системы и средства для ее транспортировки циркулирует через мундштук, позволяя охлаждать слизистую оболочку ротовой полости и поддерживать желаемую

температуру в течение требуемого времени. Недостатком прибора является его громоздкость, относительно большой вес, а также обязательное наличие воды и средства для ее транспортировки от жидкостного термостата до мундштука.

В данных условиях установлено, что целесообразным является использование в качестве средств для проведения локальной гипотермии полости рта в целях лечения радиоиндуцированного орофарингеального синдрома охлаждающих термоэлектрических устройств. Применение в качестве источника холода в данной конструкции стандартных ТЭМ позволит повысить надежность работы, экологичность, бесшумность работы, функциональность и компактность прибора [15-19].

Предлагается следующий конструктивный вариант устройства, структурная схема которого изображена на рис. 1.

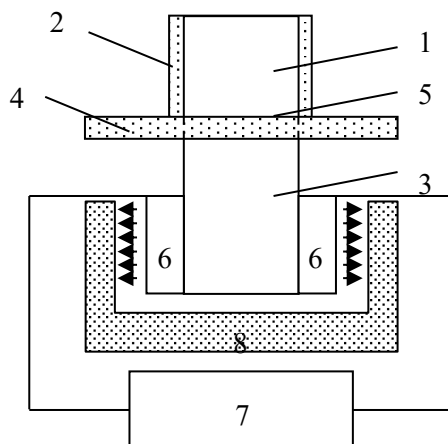


Рис. 1 – Структурная схема ТЭУ для лечения радиоиндуцированного орофарингеального синдрома методом локальной гипотермии полости рта

Fig. 1 – Structural diagram of TEU for the treatment of radiation-induced oropharyngeal syndrome using local hypothermia of the oral cavity

Устройство содержит мундштук 1, размещаемый в полости рта пациента при проведении процедур, изготовленный из высокотеплопроводного материала (например, медь или латунь), имеющий съемное гипоаллергенное покрытие 2 по всей поверхности, транспортную систему 3, находящуюся вне полости рта пациента, выполненную из того же материала и образующую с мундштуком 1 монолитную конструкцию. Разграничение между мундштуком 1 и транспортной системой 3 осуществляет ограничитель 4, изготовленный из гипоаллергенного материала в виде кольца, крепящегося с внешней стороны монолитной конструкции в области разграничения 5. Транспортная система 3 выполнена в виде прямоугольного параллелепипеда, на две противоположные более широкие боковые грани которого установлены холодной стороной ТЭМ 6. Оба ТЭМ 6 электрически соединены последовательно и питаются электрической энергией от источника постоянного электрического тока 7, образуя источник холода.

Отвод теплоты от горячей стороны ТЭМ 6 осуществляется за счет системы теплосброса 8, в качестве которой может выступать либо цельнометаллический радиатор (возможно его предварительное охлаждение во внешнем источнике холода), либо радиатор в виде полый емкости, заполненной веществом с высокой теплотой плавления и температурой плавления в пределах от 35 до 50° С (например, парафином). Дополнительно с системой теплосброса может использоваться вентиляторный агрегат, обдувающий ее и питаемый электрической энергией или от источника постоянного электрического тока 7 или дополнительного источника питания электрической энергией.

Перед началом процедуры устройство дезинфицируется. Мундштук 1 с надетым на него гипоаллергенным покрытием 2 помещается в полость рта пациента. Осуществляется питание ТЭМ 6 электрической энергией от источника постоянного электрического тока 7.

Холодная сторона ТЭМ охлаждает транспортную систему 3 и соответственно мундштук 1. Ограничитель 4, находящийся в области разграничения 5 осуществляет отделение области мундштука 1 от транспортной системы 3, предотвращая ее попадание в ротовую полость пациента. Отвод теплоты от ТЭМ осуществляется системой теплосброса 8. Во время процедуры мундштук 1 находится либо в статическом положении, либо перемещается по полости рта самим пациентом (за счет движения нижней челюсти, языка). Глубина охлаждения и продолжительность нахождения мундштука 1 в полости рта пациента определяется характером процедуры, определяемым лечащим врачом.

Обсуждение результатов. Определены основные параметры термоэлектрического устройства для лечения радиоиндуцированного орофарингеального синдрома методом локальной гипотермии полости рта на основе инженерных расчетов, которые произведены с использованием программного комплекса Thermoelectric system calculation, (разработчик ООО «Криотерм», г. Санкт-Петербург) [20]. Установлено, что в качестве источника холода в устройстве целесообразно использовать ТЭМ типа DRIFT-1,2 производства этой же компании. Транспортная система имеет длину 60 мм, ширину 40 см и толщину 5 мм, а мундштук представляет собой эллипсоид вращения, большая полуось которого равняется 60 мм, а малая полуось 40 мм (транспортная система и мундштук изготовлены из латуни). Основные характеристики ТЭМ представлены на рис. 2-6.

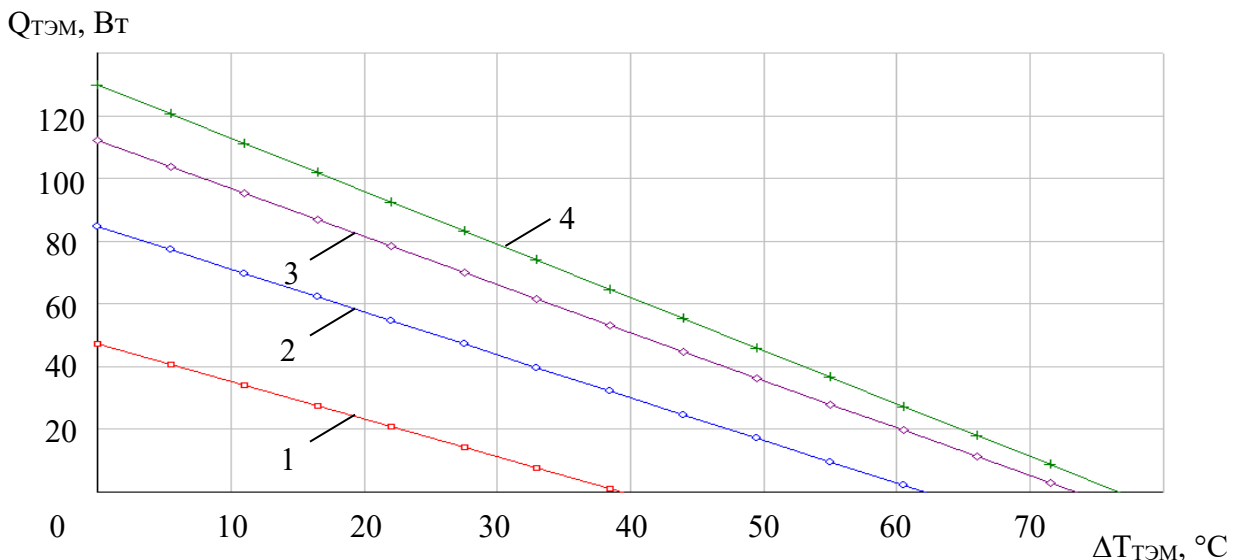


Рис. 2 – Зависимость изменения мощности ТЭМ от изменения перепада температур между спаями при различных значениях силы тока питания

1 - $I_{\text{ТЭМ}} = 2.25 \text{ A}$, 2 - $I_{\text{ТЭМ}} = 4.5 \text{ A}$, 3 - $I_{\text{ТЭМ}} = 6.26 \text{ A}$, 4 - $I_{\text{ТЭМ}} = 9 \text{ A}$

Fig. 2 – Dependence of the change in the TEM power on the change in the temperature difference between the junctions at different values of the supply current

1 - $I_{\text{ТЕМ}} = 2.25 \text{ A}$, 2 - $I_{\text{ТЕМ}} = 4.5 \text{ A}$, 3 - $I_{\text{ТЕМ}} = 6.26 \text{ A}$, 4 - $I_{\text{ТЕМ}} = 9 \text{ A}$

Они представляют собой зависимости холодопроизводительности ТЭМ $Q_{\text{ТЭМ}}$, холодильного коэффициента ε , напряжения питания $U_{\text{ТЭМ}}$ от перепада температур между спаями термоэлементов $\Delta T_{\text{ТЭМ}}$ для различных значений силы тока питания $I_{\text{ТЭМ}}$, зависимость напряжения на ТЭМ от величины тока питания при различных значениях перепада температур между спаями термоэлементов, а также зависимость холодильного коэффициента ТЭМ от тока питания. Графики представлены при температуре горячих спаев термоэлементов, входящих в ТЭМ, равной 47°C .

В соответствии с полученными данными увеличение тока питания ТЭМ вплоть до оптимального значения повышает холодопроизводительность устройства и глубину охлаждения мундштука. При этом холодильный коэффициент уменьшается, что сказывается на энергетической эффективности работы прибора.

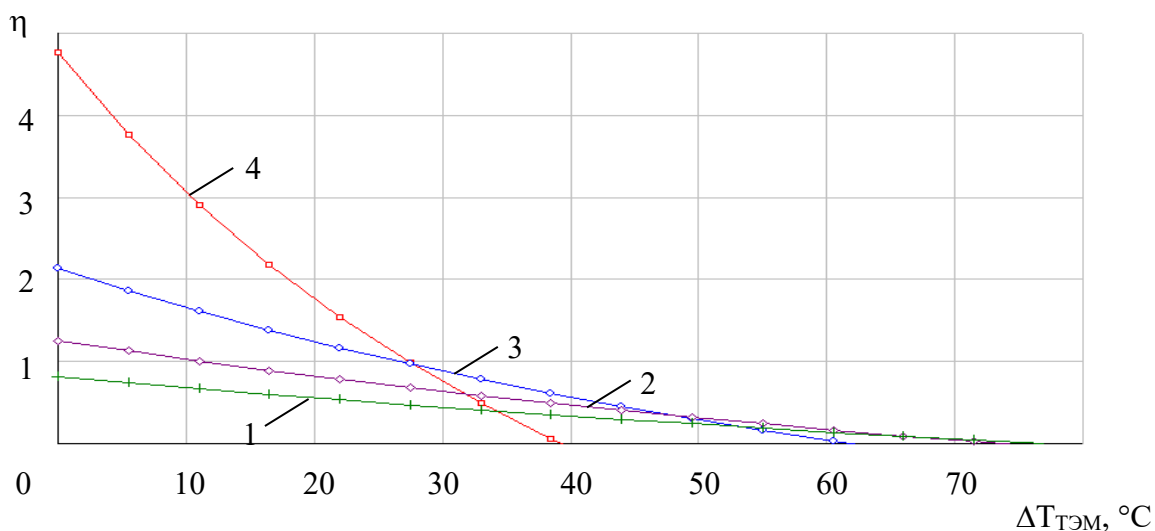


Рис. 3 – Зависимость изменения холодильного коэффициента ТЭМ от изменения перепада температур между спаями при различных значениях силы тока питания

1 - $I_{\text{ТЭМ}}=2,25$ А, 2 - $I_{\text{ТЭМ}}=4,5$ А, 3 - $I_{\text{ТЭМ}}=6,26$ А, 4 - $I_{\text{ТЭМ}}=9$ А

Fig. 3 – Dependence of the change in the coefficient of performance of the TEM on the change in the temperature difference between the junctions at different values of the supply current

1 - $I_{\text{ТЕМ}} = 2.25$ А, 2 - $I_{\text{ТЕМ}} = 4.5$ А, 3 - $I_{\text{ТЕМ}} = 6.26$ А, 4 - $I_{\text{ТЕМ}} = 9$ А

Что же касается расчетных численных данных, то в соответствии с расчетом, рабочий диапазон холодопроизводительности ТЭМ находится в пределах 37-70 Вт при среднем перепаде температур между спаями 35 К, ток питания составляет 4,8-8,2 А при потребляемой мощности 90-300 Вт. Холодильный коэффициент изменяется в пределах от 0,2 до 0,6.

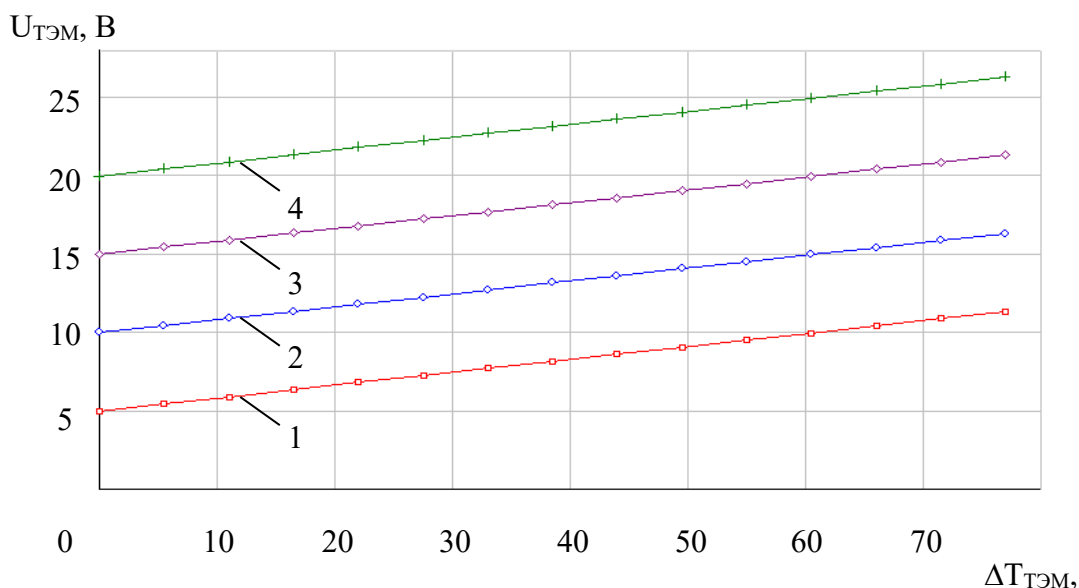


Рис. 4 –Зависимость изменения напряжения питания ТЭМ от изменения перепада температур между спаями при различных значениях силы тока питания

1 - $I_{\text{ТЭМ}}=2,25$ А, 2 - $I_{\text{ТЭМ}}=4,5$ А, 3 - $I_{\text{ТЭМ}}=6,26$ А, 4 - $I_{\text{ТЭМ}}=9$ А

Fig. 4 – Dependence of the change in the supply voltage of the TEM on the change in the temperature difference between the junctions at different values of the supply current

1 - $I_{\text{ТЕМ}} = 2.25$ А, 2 - $I_{\text{ТЕМ}} = 4.5$ А, 3 - $I_{\text{ТЕМ}} = 6.26$ А, 4 - $I_{\text{ТЕМ}} = 9$ А

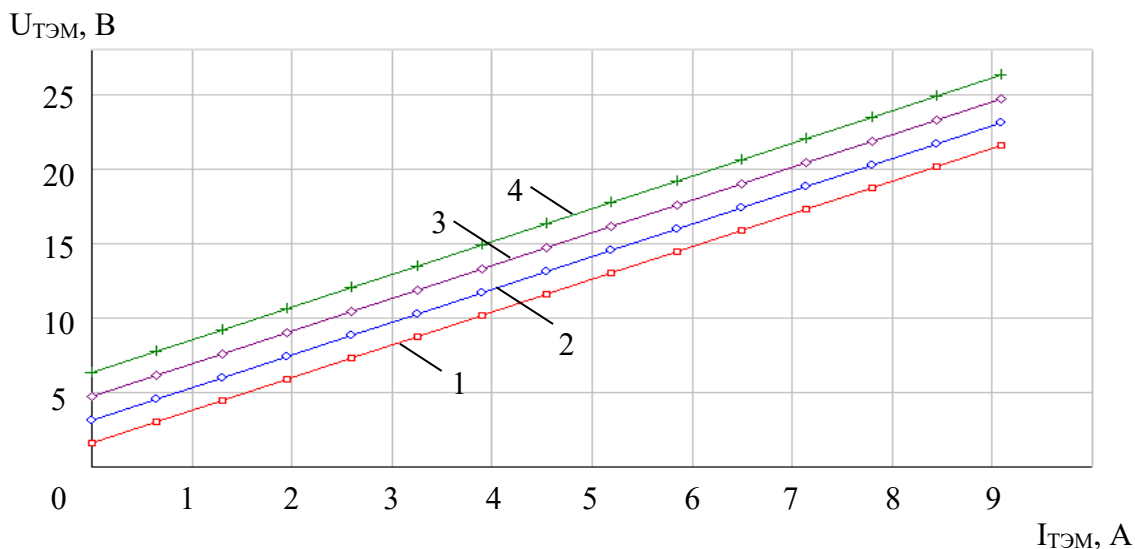


Рис. 5 – Зависимость изменения напряжения ТЭМ от изменения величины тока питания при различных значениях перепада температур между спаями

1- $\Delta T_{TEM} = 19,25 K$, 2- $\Delta T_{TEM} = 38,5 K$, 3 - $\Delta T_{TEM} = 57,75 K$, 4 - $\Delta T_{TEM} = 77 K$

Fig. 5 – Dependence of the change in the TEM voltage on the change in the supply current at different values of the temperature difference between the junctions

1 - $\Delta T_{TEM} = 19,25 K$, 2 - $\Delta T_{TEM} = 38,5 K$, 3 - $\Delta T_{TEM} = 57,75 K$, 4 - $\Delta T_{TEM} = 77 K$

Как показали результаты исследований, приведенная в статье конструкция позволяет обеспечить локальную гипотермию полости рта пациентов, проходящих курс химио- и биолучевой терапии опухолей головы и шеи. В данном случае температура мундштука, находящегося в полости рта, может быть снижена до значения $8^{\circ} C$, что соответствует результатам, изложенным в работе [14]. При этом рассмотренная в статье конструкция устройства для лечения радиоиндуцированного орофарингеального синдрома, выполненная на основе охлаждающего термоэлектрического устройства, будет обладать существенно меньшими габаритными размерами, не требовать применения жидкого теплоносителя, обеспечивать бесшумность и высокий ресурс работы.

Вывод. Предложена конструкция охлаждающего термоэлектрического устройства.

На основе расчетов в специализированном программном комплексе определен тип ТЭМ, который можно использовать в разработанной конструкции.

Установлено, что для обеспечения проведения лечебных процедур, связанных с локальной гипотермией полости рта, транспортная система, выполненная в виде прямоугольного параллелепипеда, может иметь длину 60 мм, ширину 40 см и толщину 5 мм, а мундштук, представляющий собой эллипсоид вращения, иметь длину большой полуоси, равную 60 мм, а малой полуоси - 40 мм, причем и транспортная система и мундштук изготавливаются из латуни. Параметры 2 ТЭМ типа DRIFT-1,2 следующие: рабочий диапазон холодопроизводительностей единичного ТЭМ - от 37 до 70 Вт при среднем перепаде температур между спаями 35 K, ток питания - от 4,8 до 8,2 А при потребляемой мощности от 90 до 300 Вт, холодильный коэффициент - от 0,2 до 0,6.

Библиографический список:

1. Легеза В.И., Драчев И.С., Чепур С.В. Осложнения лучевой противоопухолевой терапии. Санкт-Петербург: СпецЛит, 2022. - 207 с
2. Элтинг Л.С., Киф Д.М., Сонис С.Т., [и др.] Измерения орального мукозита, сообщаемые пациентами, у пациентов с раком головы и шеи, получавших лучевую терапию с химиотерапией или без нее // Рак. - 2008 - Том 113 (10). – С. 2704-2713.
3. Тротти А., Беллм Л.А., Эпштейн Б., [и др.]. Частота, тяжесть и связанные с мукозитом исходы у пациентов с раком головы и шеи, получающих лучевую терапию с химиотерапией или без нее: систематический обзор литературы // Радиотерапия и онкология. - 2003. - Том 66 (3). - С. 253-262.

4. Ши А., Миасковски К., Додд М.Дж., [и др.]. Механизмы радиационно-индуцированного орального мукозита и его последствия //Онкологическая сестринская помощь. - 2003. - Том 26 (3). - С. 222-229.
5. Сонис С.Т. Оральный мукозит при раке головы и шеи: риск, биология и лечение // Учебное пособие Американского общества клинической онкологии. - 2013. - Том 33. - С. 236-240.
6. Лалла Р.В., Сонис С.Т., Петерсон Д.Е. Лечение орального мукозита у пациентов с раком // Стоматологические клиники Северной Америки. - 2008. - Том 52 (1). - С. 61-77.
7. Цан Д.-Л., Лин Ч.-Ю., Кан Ч., [и др.]. Сравнение еженедельного и трехнедельного применения цисплатина одновременно с лучевой терапией у пациентов с послеоперационным плоскоклеточным раком полости рта высокого риска // Радиотерапия и онкология. - 2012. - Том 7. - С. 1-8.
8. Musio D., De Felice F., Bulzonetti N., Tombolini V. Цетуксимаб и мукозит полости рта: отличается ли он от мукозита полости рта, вызванного другими препаратами? // Отоларингология. - 2013. - Том 3 (4). - С. 147-150.
9. Walsh L., Gillham C., Dunne M. [и др.]. Токсичность цетуксимаба по сравнению с цисплатином при одновременном применении с лучевой терапией при местнораспространенном плоскоклеточном раке головы и шеи (LAHNSCC) // Радиотерапия и онкология. - 2011. - Том. 98 (1). - С. 38-41.
10. Лалла Р.В., Боуэн Дж., Бараш А., [и др.]. Клинические рекомендации MASCC/ISOO по лечению мукозита, вторичного по отношению к противораковой терапии // Рак. - 2014. - Том 120 (10). - С. 1453-1461.
11. Хаддад Р., Сонис С., Познер М., [и др.]. Рандомизированное исследование фазы 2 сопутствующей химиолучевой терапии с использованием еженедельного карбоплатина/паклитаксела с ежедневным подкожным введением амифостина или без него у пациентов с местнораспространенным раком головы и шеи // Рак. - 2009. - Том 115 (19). - С. 4514-4523.
12. Меировиц А., Кутен М., Биллан С., [и др.]. Уровни цитокинов, тяжесть острого мукозита и необходимость установки ПЭГ-трубки во время химиолучевой терапии рака головы и шеи — проспективное пилотное исследование // Радиотерапия в онкологии. — 2010. — Том 5. — С. 1-7.
13. Ксантиниак А., Николату-Галитис О., Атанасиаду П., [и др.]. Апоптотические и воспалительные маркеры при оральном мукозите у пациентов с раком головы и шеи, получающих лучевую терапию: предварительный отчет // Поддерживающая терапия при раке. — 2008. — Том 16 (9). — С. 1025-1033.
14. Джава Валладбеги, Роджер Хенрикссон, Бьорн Тавелин и др. Эффективность нового устройства для криопротекции орального мукозита: рандомизированное, слепое, многоцентровое, параллельное исследование 3-й фазы // Трансплантация костного мозга. - 2022. - Т. 57. - С. 191-197.
15. Ху Б., Ши Х.-Л., Чен З.-Г., Цзоу Дж. Термоэлектрические устройства для медицинских применений: прогресс, проблемы и перспективы // Журнал химической инженерии. - 2022. - Т. 437. - С. 135268.
16. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Магомедова С.Г., Набиев Н.А. Модель термоэлектрического устройства для тепловой терапии рефлексогенных зон//Биомедицинская инженерия. - 2020 - Т. 54. - С. 56-59.
17. Евдулов О.В., Магомедова С.Г. Термоэлектрическая система для лечения пародонтальных заболеваний методом локальной гипотермии / Биомедицинская инженерия. - 2023. Т. 57. - С. 5-8.
18. Заферани С.Х., Гомашчи Р., Сэмс М.В., Чен З.-Г. Термоэлектрические охладители как системы терморегулирования для медицинского применения: проектирование, оптимизация и совершенствование // Наноэнергетика. - 2021. - Т. 90. - С. 106572.
19. Ассылбекова Л., Алдияров Н., Евдулов О., Кулдеев Н. Математическое моделирование термофизических процессов в термоэлектрическом устройстве для охлаждения мозга // Бионанонаука. - 2024. - Т. 14. - С. 1428-1441.
20. <http://www.kryotherm.ru> (дата доступа 01.10.2025).

References:

1. Legeza V.I., Drachev I.S., Chepur S.V. Complications of radiation antitumor therapy. St. Petersburg: SpetsLit, 2022; 207 (In Russ)
2. Elting L.S. Keefe D.M. Sonis S.T., [et al.] Patient-reported measurements of oral mucositis in head and neck cancer patients treated with radiotherapy with or without chemotherapy. *Cancer*. 2008;113(10): 2704-2713.
3. Trotti A., Bellm L.A., Epstein B., [et al.]. Mucositis incidence, severity and associated outcomes in patients with head and neck cancer receiving radiotherapy with or without chemotherapy: a systematic literature review. *Radiotherapy Oncology*. 2003;66 (3):253-262.
4. Shih A., Miaskowski C., Dodd M.J., [et al.]. Mechanisms for radiation-induced oral mucositis and the consequences. *Cancer Nursing*. 2003; 26 (3): 222-229.
5. Sonis S.T. Oral mucositis in head and neck cancer: risk, biology, and management. *American Society of Clinical Oncology Educational Book*. 2013; 33: 236-240.
6. Lalla R.V., Sonis S.T., Peterson D.E. Management of oral mucositis in patients who have cancer. *Dental Clinics of North America*. 2008;52 (1): 61-77.
7. Tsan D.-L., Lin C.-Y., Kang C., [et al.]. The comparison between weekly and three-weekly cisplatin delivered concurrently with radiotherapy for patients with postoperative high-risk squamous cell carcinoma of the oral cavity. *Radiotherapy Oncology*. 2012;7:1-8.

8. Musio D., De Felice F., Bulzonetti N., Tombolini V. Cetuximab and oral mucositis: is it different from oral mucositis caused by other drugs? *Otolaryngology*. 2013;3 (4):147-150.
9. Walsh L., Gillham C., Dunne M. [et al.]. Toxicity of cetuximab versus cisplatin concurrent with radiotherapy in locally advanced head and neck squamous cell cancer (LAHNSCC). *Radiother. Oncol.* 2011;98 (1): 38-41.
10. Lalla R.V., Bowen J., Barasch A., [et al.]. MASCC/ISOO clinical practice guidelines for the management of mucositis secondary to cancer therap. *Cancer*. 2014;120 (10):1453-1461.
11. Haddad R., Sonis S., Posner M., [et al.]. Randomized phase 2 study of concomitant chemoradiotherapy using weekly carboplatin/paclitaxel with or without daily subcutaneous amifostine in patients with locally advanced head and neck cancer. *Cancer*. 2009; 115 (19): 4514-4523.
12. Meirovitz A., Kuten M., Billan S., [et al.]. Cytokines levels, severity of acute mucositis and the need of PEG tube installation during chemo-radiation for head and neck cancer-a prospective pilot study. *Radiotherapy Oncology*. 2010; 5:1-7.
13. Xanthinaki A., Nicolatou-Galitis O., Athanassiadou P., [et al.]. Apoptotic and inflammation markers in oral mucositis in head and neck cancer patients receiving radiotherapy: preliminary report. *Supportive Care in Cancer*. 2008; 16 (9):1025-1033.
14. Java Walladbegi, Roger Henriksson, Björn Tavelin, et al. Efficacy of a novel device for cryoprevention of oral mucositis: a randomized, blinded, multicenter, parallel group, phase 3 trial. *Bone marrow transplantation*. 2022; 57:191-197.
15. Hu B., Shi X.-L., Chen Z.-G., Zou J. Thermoelectrics for medical applications: progress, challenges and perspectives. *Chemical engineering journal*. 2022; 437:135268.
16. Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Magomedova S.G., Nabiev N.A. Model of a thermoelectric device for heat treatment of reflex-ogenic zones. *Biomedical Engineering*. 2020;54: 56-59.
17. Evdulov O.V., Magomedova S.G. A thermoelectric system for the treatment of periodontal diseases by local hypothermia. *Biomedical Engineering*. 2023; 57: 5-8.
18. Zaferani S.H., Ghomashchi R., Sams M.W., Chen Z.-G. Thermoelectric coolers as thermal management systems for medical application: design, optimization and advancement. *Nano energy*. 2021; 90:106572.
19. Assylbekova L., Aldiyarov N., Yevdulov O., Kuldeev N. Mathematical modeling of thermophysical processes in a thermoelectric device for cooling the brain. *BioNanoScience*. 2024;14:1428-1441.
20. <http://www.kryotherm.ru> (дата доступа 01.10.2025).

Сведения об авторах:

Евдулов Олег Викторович, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и общей электротехники; профессор кафедры инженерной физики; ole-ole-ole@rambler.ru

Кардашев Анвар Магомедович, врач радиотерапевт; anvarkard@gmail.com

Магомедов Гаджиав Гаджимагомедович, аспирант кафедры теоретической и общей электротехники; gadjiyav1999@mail.ru.

Хазамова Мадина Абдулаевна, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой теоретической и общей электротехники; kaftoe2016@yandex.ru.

Information about authors:

Oleg V. Evdulov, Dr. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering; Prof. of the Department of Engineering Physics; ole-ole-ole@rambler.ru

Anvar M. Kardashev, radiation therapist; anvarkard@gmail.com.

Gadzhiev G. Magomedov, Postgraduate Student, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; gadjiyav1999@mail.ru.

Madina A. Khazamova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Department of Theoretical and General Electrical Engineering; kaftoe2016@yandex.ru.

Information about authors:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 28.10.2025.

Одобрена после рецензирования/Reviced 30.11.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 18.01.2026.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 532.517.4:536.24

DOI: 10.21822/2073-6185-2026-53-1-15-22



Оригинальная статья /Original article

**Моделирование течения и теплоотдачи в трубах с турбулизаторами
для перспективных теплообменников при больших и очень больших
(от миллиона до миллиарда) критериях Рейнольдса**

И.Е. Лобанов

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, Россия

Резюме. Цель. Рассматривается решение задачи о теплообмене для турбулизаторов потока полукруглого поперечного сечения на основе многоблочных вычислительных технологий, основанных на решении факторизованным конечно-объемным методом (ФКОМ) уравнений О.Рейнольдса (замыкаемых для переходного режима при помощи модели переноса сдвиговых напряжений Ф.Ментера) и уравнения энергии (на разномасштабных пересекающихся структурированных сетках). **Метод.** Расчёт проводился на базе теоретического метода, основанного на решении факторизованным конечно-объемным методом уравнений О.Рейнольдса, замыкаемых для переходных режимов с помощью модели переноса сдвиговых напряжений Ф.Ментера, и уравнения энергии на разномасштабных пересекающихся структурированных сетках (ФКОМ). **Результат.** Расчётным методом осуществлено математическое моделирование теплообмена в трубах с турбулизаторами для вязких теплоносителей при очень высоких (вплоть до миллиарда) критериях О.Рейнольдса, характерных развитых турбулентных режимов течения. Применённым методом ФКОМ в работе были получены как локальные, так и осреднённые характеристики потока и теплообмена в трубах с турбулизаторами для вязкого теплоносителя для развитого режима течения теплоносителя, что позволило детерминировать для этих режимов уровни интенсификации теплообмена. **Вывод.** Постулируется интенсифицирование теплосъёма на воздухе для высоких миллионных критериях О.Рейнольдса, что потенциально актуально для канальных течений в каналах теплообменников, с заметными повышениями гидросопротивлений и может повышаться относительно уменьшенных критериев О.Рейнольдса для больших относительных выступов $d/D=0,90$. Сформулировано, что для миллиардных критериях О. Рейнольдса каналы с выступами проигрывают каналам с шероховатостями в разрезе интенсифицирования теплосъёма, поскольку имеет место меньший уровень интенсификации теплообмена при приблизительно таком же увеличении относительного гидравлического сопротивления.

Ключевые слова: математическое моделирование, теплоотдача, поперечный, профиль, турбулизатор, шероховатость, полукруг, критерий О.Рейнольдса, теплообменный аппарат

Для цитирования: И.Е. Лобанов. Моделирование течения и теплоотдачи в трубах с турбулизаторами для перспективных теплообменников при больших и очень больших (от миллиона до миллиарда) критериях Рейнольдса. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(1):15-22. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-15-22.

**Modeling flow and heat transfer in pipes with turbulators for advanced heat exchangers
with high and very high (from a million to a billion) Reynolds numbers**

I.E.Lobanov

Moscow Aviation Institute (National Research University),
4 Volokolamskoe highway, Moscow 125993, Russia

Abstract. Objective. The paper considers the solution of the heat transfer problem for flow turbulators with a semicircular cross-section using multiblock computational technologies based on the solution of Reynolds' equations (closed for the transient regime using Menter's shear stress transport model) and the energy equation (on intersecting structured grids of different scales) by the factorized finite volume method (FVM). **Method.** The paper uses computational methods to mathematically model heat transfer in pipes with turbulators for viscous coolants at very high (up to a billion) Reynolds criteria, characteristic of developed turbulent flow regimes. **Result.** The calculations were performed using a theoretical method based on the solution of Reynolds' equations by the factorized finite volume method, closed for transient regimes using Menter's shear stress transport model, and the energy equation on intersecting structured grids of different scales (FVM). Using the FKOM method, both local and average flow and heat transfer characteristics were obtained in pipes with turbulators for a viscous coolant for a developed coolant flow regime. This allowed us to determine heat transfer intensification levels for these regimes. **Conclusion.** Heat transfer intensification in air is postulated for high millionth O. Reynolds criteria, which is potentially relevant for channel flows in heat exchanger channels, with noticeable increases in hydraulic resistance and can increase relative to reduced O. Reynolds criteria for large relative protrusions $d/D = 0.90$. It was formulated that for billionth O. Reynolds criteria, channels with protrusions are inferior to channels with roughness in terms of heat transfer intensification, since there is a lower level of heat transfer intensification with approximately the same increase in relative hydraulic resistance.

Keywords: mathematical modeling, heat transfer, transverse, profile, turbulator, roughness, semicircle, O. Reynolds criterion, heat exchanger

For citation: I.E. Lobanov. Modeling flow and heat transfer in pipes with turbulators for advanced heat exchangers with high and very high (from a million to a billion) Reynolds numbers. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):15-22. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-15-22.

Введение. Основные направления настоящего исследования кратко можно охарактеризовать следующим образом: дополнительным образом верифицировать реализуемый способ вычисления теплосъёма в каналах с турбулизаторами при максимально высоких дозвуковых чисел О.Рейнольдса, что до сих пор исследовалось существующим экспериментом, собственно экспериментальными данными, а также данными иных теоретических подходов [1, 2, 7, 17].

Постановка задачи. На базе верификации модели реализовать вычисления для более высоких чисел О.Рейнольдса (от десятков тысяч до миллиона, и далее до миллиарда), в которых отсутствуют надёжный экспериментальный материал. Вычисленные расчётные данные в дополнительной степени следует сравнивать с соответствующими данными для шероховатых каналов.

Задачи данного исследования:

- дополнительно верифицировать данный метод расчёта теплообмена в трубах с турбулизаторами для предельно высоких чисел Рейнольдса, которые исследовались в существующих экспериментах [13, 14], собственно экспериментальными данными, а также данными других теоретических подходов [3-12, 16-18, 20-21];
- провести расчёты для более высоких чисел Рейнольдса ($Re=10^4 \div 10^6$ и вплоть до $Re \leq 10^9$), где ещё нет надёжных экспериментальных данных;
- полученные расчёты дополнительно сравнить с соответствующими значениями для шероховатых труб.

Методы исследования. Анализ влияния на осреднённо-интегральные параметры интенсифицированного теплосъёма в каналах с турбулизаторами структур интенсифицированных потоков при высоких, порядка миллиона, и очень больших, порядка миллиарда, критериев О. Рейнольдса.

Имеющиеся на данный момент времени результаты анализа влияния на интегрально-осреднённые характеристики течений и теплосъёма в каналах с турбулизаторами структур интенсифицированного потока при относительно небольших критериях О.Рейнольдса (от десятков до сотен тысяч) обосновывают, что рациональнее применять турбулизаторы полукруглых трансверсальных профилей, нежели прямоугольных [9, 12].

Для миллионных и миллиардных критериев О.Рейнольдса достаточно ограничения анализа характеристик течений и теплосъёма каналами с турбулизаторами полукруглых трансверсальных профилей; особенности развития вихревых структур для прямоугольных турбулизаторов для больших чисел Рейнольдса требуют специального исследования. К примеру, для воздуха ощутимые снижения кинематических вязкостей будут иметь место при высоких давлениях [15, 19]. Следовательно, исследуемые в статье режимы течения с очень высокими критериями О.Рейнольдса можно обоснованно считать актуальными.

Обсуждение результатов. Были вычислены расчётные линии тока для исследуемых условий $t/D=0,25 \div 1,00$, $Re=10^6$, $Pr=0,72$, $d/D=0,90$, а также проводилось сравнения между линиями тока для аналогичных условий для миллионными и миллиардными критериями О.Рейнольдса (рис. 1).

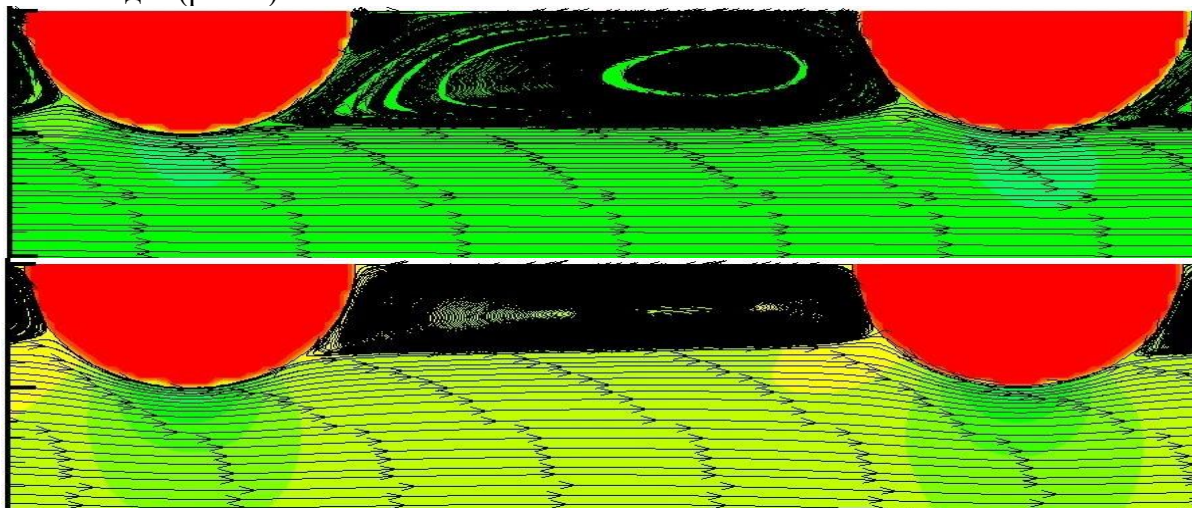


Рис. 1 – Линии тока для каналов с выступами полукруглых трансверсальных профилей для закрытых впадин для воздуха с $Re=10^9$ (снизу) и $Re=10^6$ (сверху)

Fig. 1 – Streamlines for channels with protrusions of semicircular transverse profiles for closed cavities for air with $Re=10^9$ (bottom) and $Re=10^6$ (top)

Как показывают расчётные линии тока для рассматриваемых условий $t/D=0,25 \div 1,00$, $Pr=0,72$, $Re=10^6$, $d/D=0,90$, сперва, вплоть до миллиардных критериев О.Рейнольдса на выступах полукруглых трансверсальных профилей приросты дополнительного углового вихря, как до выступа, так и за выступом, происходит не столь ощутимо, нежели при сотнях тысяч критериев О.Рейнольдса, что приводит к незначительным приростам гидравлических потерь.

При дальнейшем увеличении критерия О.Рейнольдса вплоть до $Re=10^9$ для закрытых впадин ($d/D=0,90$, $t/D=0,25$), как видно на рис. 1, происходит выдавливание основным потоком основного вихря в направлении стенки, он становится меньше, начало основного вихря, в отличие от $Re=10^6$, имеет место не приблизительно в верхней точке полукруглого турбулизатора, а сдвигается в направлении к стенке приблизительно на треть высоты турбулизатора. Присоединение основного вихря к последующему турбулизаторами при $Re=10^9$ происходит также ближе к стенке, примерно на половине турбулизатора, т.е. также происходит дальнейший сдвиг точки присоединения в направлении стенки по сравнению со случаем при $Re=10^6$ (рис. 1). Кроме основного вихря при переходе с больших ($Re=10^6$) на очень большие ($Re=10^9$) критерии О.Рейнольдса деформируются угловые вихри как до, так и за турбулизаторами. Как показывают вычисления, при очень больших критериях О. Рейнольдса ($Re=10^9$), в отличие от больших чисел Рейнольдса ($Re=10^6$), имеет место

вытеснение основным потоком угловых вихрей, а основной вихрь становится более заполненным. Вышеуказанное обуславливает не очень сильное уменьшение увеличения уровня интенсификации теплообмена, при прочих равных условиях, при переходе с $Re=10^6$ до $Re=10^9$ по сравнению с переходом с $Re=10^5$ до $Re=10^6$: уменьшение высоты основного вихря несколько снижает уровень интенсификации теплообмена, а вытеснение угловых вихрей частично компенсирует вышеупомянутое уменьшение, поскольку основной вихрь увеличивается, кроме того, устраняются застойные зоны как до, так и за выступами.

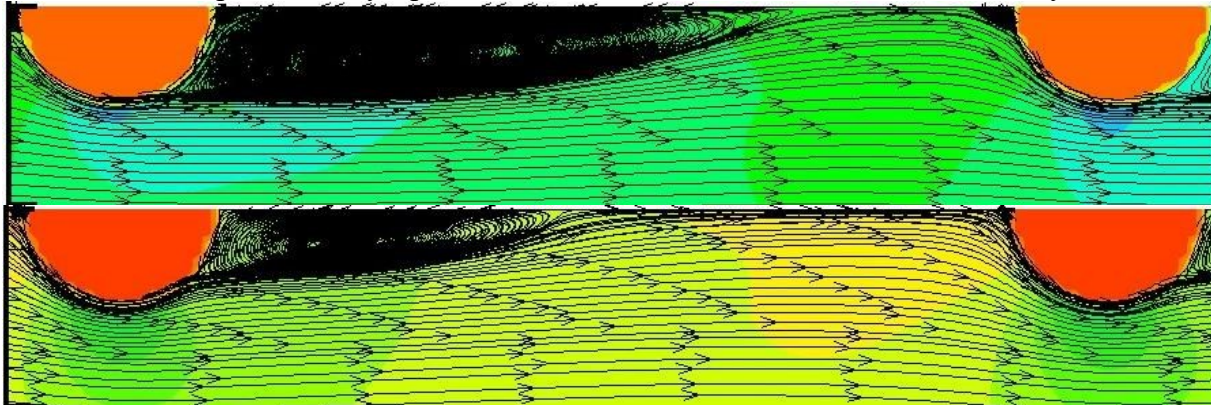


Рис. 2 – Линии тока для каналов с выступами полукруглых трансверсальных профилей для закрытых впадин для воздуха с $Re=10^9$ (снизу) и $Re=10^6$ (сверху)

Fig. 2 – Streamlines for channels with protrusions of semicircular transverse profiles for closed cavities for air with $Re=10^9$ (bottom) and $Re=10^6$ (top)

У высокой ($d/D=0,90$) полуоткрытой ($t/D=0,50$) впадины последующее повышение критериев О.Рейнольдса до миллиарда (рис. 2) смещает точки отрывов в направлениях к стенкам по образующим полукруглых выступов на расстояния, равные порядка третей высот выступов, в то время как для аналогичных условий при $Re=10^6$ для точка отрыва находится в районе вершины турбулизатора.

Вышеуказанное обуславливает снижение относительной интенсификации теплообмена, поскольку отрыв потока и его последующее присоединение происходит на меньшей длине (рис. 2).

Деформирование угловых вихрей как до, так и за выступами (рис. 2) по причине основных потоков реализуются и в случае закрытых впадин, но в определённо меньших степенях: небольшие вихри за выступами вытесняются в практическом смысле в полной мере (рис. 2), однако части угловых вихрей до турбулизатора остаются. Здесь вытеснение основным вихрём угловых вихрей уже не столь ощутимо увеличивает основной вихрь, как в случае с закрытыми впадинами, поэтому это обстоятельство уже мало компенсирует снижение относительной интенсификации теплообмена, вследствие смещения точки отрыва ближе к стенке. Как показали вычисления, точка присоединения турбулентного пограничного слоя расположена при $Re=10^9$ ближе к турбулизатору примерно на треть, чем для аналогичных условий при $Re=10^6$ - это происходит как раз по причине выдавливания основным потоком точки присоединения ближе к стенке.

Вышесказанное обуславливает более сильное уменьшение увеличения уровня интенсификации теплообмена для полуоткрытых впадин по сравнению с закрытыми впадинами, при прочих равных условиях, при переходе с $Re=10^6$ до $Re=10^9$ по сравнению с переходом с $Re=10^5$ до $Re=10^6$.

Для открытых впадин ($d/D=0,90$, $t/D=1,00$) дальнейшее увеличение критерия О. Рейнольдса вплоть до $Re=10^9$ приводит к тому, что, как и в случае с полуоткрытыми впадинами, точка отрыва будет смещаться по образующей полукруглого турбулизатора в сторону стенки, достигая почти до половины высоты турбулизатора, на что указывают сравнения полученных вычислений. Вышеуказанное обуславливает, так же, как и для полуоткрытой впадины, но в ещё большей степени снижение относительной интенсификации теплообмена, т.к. отрыв потока и его последующее присоединение происходит на ещё меньшей

длине. Было выявлено качественное различие отрыва и присоединения потока при $Re=10^9$ от аналогичного случая при $Re=10^6$.

Как показали вычисления, точка присоединения турбулентного пограничного слоя для случая с открытой впадиной в при $Re=10^9$ располагается явно приближенным образом к выступу, чем для аналогичных случаев с миллиардным критерием О. Рейнольдса, поэтому прирост теплосъёма будет на уменьшенных длинах, что уменьшает осреднённый теплосъём.

Таким образом, выдавливания внешними течениями при миллиардных критериях О. Рейнольдса вихрей за полукруглыми выступами станет большим, чем для соответствующих случаев с миллионными критериями О. Рейнольдса.

Деформирование угловых вихрей при $Re=10^9$ как до, так и за турбулизаторами для открытых впадин, за счёт основного, имеет место в ещё большей степени, чем для полукруглых впадин: угловой вихрь за турбулизатором выдавливается основным потоком полностью, а угловой вихрь до турбулизатора становится гораздо меньше, чем при $Re=10^6$.

Вышесказанное обуславливает для открытых впадин ещё более ощутимое уменьшение увеличения уровня интенсификации теплообмена, при прочих равных условиях, при переходе с $Re=10^6$ до $Re=10^9$ по сравнению с переходом с $Re=10^5$ до $Re=10^6$: уменьшение высоты основного вихря ещё сильнее, чем в случае полукруглых впадин, уменьшает уровень интенсификации теплообмена, поскольку приближает точку присоединения к точке отрыва, но вытеснение угловых вихрей уже мало скомпенсировано данное снижение интенсифицирования теплосъёма.

Для выступов полукруглых трансверсальных профилей при миллиардных критериях О. Рейнольдса происходят дальнейшие деформации и вытягивания главных вихрей, что обуславливает очень незначительные повышает относительные гидросопротивления для выступов полукруглого трансверсального профиля при миллионных критериях О. Рейнольдса, т.к. при данных условиях не происходят генерирования дополнительного вихреобразования и трения вихрей между собой; подобные тенденции сохраняются при соответствующих случаях с миллиардными значениями критериев О. Рейнольдса (рис. 1 и рис. 2).

Для условий при миллионных критериях О. Рейнольдса вырабатывания турбулентностей, как при менее высоких критериях О. Рейнольдса, реализуются на границах смерчевых зон в периоды их развития и при разложениях самих зон за её выбросами.

Для выступов с полукруглыми трансверсальными профилями при миллионными критериями О. Рейнольдса тоже реализуются не генерации, объединение и распад вторичных вихрей, что исследовалось в [13, 17], а их деформирования.

Максимальные деформирования реализуются у главного вихря, что дополнительно увеличивают гидросопротивления при миллионных критериях О. Рейнольдса не в той мере, когда реализовывались данные совокупности с вторичными вихрями (например, у выступов с квадратными трансверсальными профилями. Вышесказанное даже усиливается для соответствующих условиях для миллиардных критериев О. Рейнольдса (рис. 1 и рис. 2), где вторичные вихри не наблюдаются.

Очевидно, что и для довольно высоких миллиардных критериях О. Рейнольдса широкий вихрь не идёт в распад, а только изменяется, которое реализуется и в стороны выступа, и в сторону ядер течения. Для высоких миллионных критериях О. Рейнольдса интенсифицирование теплосъёма может повышаться без ощутимых повышений гидросопротивлений при реализацией выступов с полукруглыми трансверсальными профилями, но для выступов резких очертаний выступов. Данная тенденция сохраняется и для аналогичных случаев при $Re=10^9$ (рис. 1 и 2). Вычисленные линии токов при повышении критериев О. Рейнольдса до миллиона на выступах полукруглых трансверсальных профилей приводят к росту присоединённых смерчей в углах до и за выступами, но не так значительно, как для сотен тысяч критериев О. Рейнольдса, поэтому повышения гидросопротивлений незначительны. С дальнейшим миллиардным повышением критериев О. Рейнольдса реализуются даже выдавливания основными течениями смерчей в углах, что усиливает вышеуказанную тенденцию.

Сравнение показателей гидравлического сопротивления и теплообмена в трубах с полукруглыми турбулизаторами при $t/D=0,25\div 1,00$, $d/D=0,90$, $Pr=0,72$ для высоких и сверхвысоких критериях О.Рейнольдса (от миллиона до миллиарда), которые вычислены по настоящей методике, с соответствующими характеристиками для шероховатого канала по авторской теории [3], указывает на нижеследующее.

У шероховатого канала с повышением для других одинаковых параметрах критерия О.Рейнольдса с миллиона до миллиарда относительные гидросопротивления повышаются приблизительно в два с четвертью раза, что согласуется с уровнем относительных гидросопротивлений в каналах с выступами полукруглых трансверсальных профилей при $t/D=0,50$ и $t/D=0,25$ (для $t/D=1,00$ данное превалирование относительных гидросопротивлений уменьшены в два раза приблизительно). Относительный теплообмен увеличивается порядка трёх раз [3], в то время как для каналов с выступами соответствующее вышеуказанное превалирование находится в районе четверти.

Таким образом, для максимально высоких дозвуковых критериях О.Рейнольдса шероховатый канал может быть иметь преимущественным перед каналами с выступами в разрезе интенсификации теплосъёма, поскольку может иметь место бóльший уровень интенсификации теплообмена при примерно таком же увеличении относительного гидравлического сопротивления. Успешное моделирование интенсифицированной теплоотдачи в трубах с полукруглыми турбулизаторами для $Pr=0,72$, $Re=10^6\div 10^9$, $d/D=0,90$, $t/D=0,25\div 1,00$, проведённое в настоящей статье, т.е. при течениях с очень большими критериями Рейнольдса, обосновывает дальнейшие исследования в этом направлении для других чисел Прандтля, других относительных высот турбулизаторов (т.е. при других d/D), других сечений турбулизаторов (например, квадратных, треугольных и т.п.).

Вывод. В статье представлены результаты моделирования теплосъёма в каналах с турбулизаторами полукруглого трансверсального профиля дл миллионных и миллиардных критериях О. Рейнольдса, базирующиеся на многоблочных вычислительных технологиях, с решениями факторизованными конечно-объёмными методами (ФКОМ-ами) рейнольдсовых уравнений, которые замыкались посредством моделей перенесения напряжения сдвигов Ф.Ментера и энерго-уравнения на структуризованной пересекающейся неодноразмерно-масштабных сетках.

Постулируется интенсифицирование теплосъёма на воздухе для высоких миллионных критериях О.Рейнольдса, что потенциально актуально для канальных течений в каналах теплообменников современной индустрии, с заметными повышениями гидросопротивлений и может повышаться относительно уменьшенных критериев О. Рейнольдса для больших относительных выступов $d/D=0,90$. При миллиардных критериев О. Рейнольдса относительные интенсифицирования теплосъёма не сильно возрастают сравнительно с миллионными, однако они, определённым образом ниже, по сравнению с аналогичными условиями для повышения с сотен миллионов до миллионов до $Re=10^6$, в особенности при открытой впадине, т.е. для $t/D=1,00$.

Сформулировано, что для миллиардных критериях О. Рейнольдса каналы с выступами проигрывают каналам с шероховатостями в разрезе интенсифицирования теплосъёма, поскольку имеет место меньший уровень интенсификации теплообмена при приблизительно в таком же увеличении относительного гидравлического сопротивления.

Теория может использоваться для естественно-научных основ для расчёта теплообмена в переходных областях течений в каналах с турбулизаторами, применяемых в теплообменных аппаратах, используемых в современной индустрии.

Библиографический список:

1. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодическими выступами // Вестник МАИ. — 2004. — Т. 11. — № 2. — С. 28—35.
2. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодически расположенными поверхностными турбулизаторами потока // Теплофизика высоких температур. — 2005. — Т. 43. — № 2. — С. 223—230.

3. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. — М.: Машиностроение, 1990. — 208 с.
4. Лобанов И.Е. Математическое моделирование гидравлического сопротивления в трубах с шероховатыми стенками // Инженерная физика. — 2011. — № 10. — С. 3—11.
5. Лобанов И.Е. Математическое моделирование гидравлического сопротивления в трубах с шероховатыми стенками на базе принципа суперпозиции полной вязкости // 10-я Международная конференция «Авиация и космонавтика — 2011». 8—10 ноября 2011 года. Москва. Тезисы докладов. — СПб.: Мастерская печати, 2011. — С. 60—61.
6. Лобанов И.Е. Математическое моделирование гидравлического сопротивления в трубах с шероховатыми стенками с нерегулярной шероховатостью на базе принципа суперпозиции полной вязкости // 11-я Международная конференция «Авиация и космонавтика — 2012». 13—15 ноября 2012 года. Москва. Тезисы докладов. — СПб.: Мастерская печати, 2012. — С. 386—387.
7. Лобанов И.Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах: Дисс. ... докт. техн. наук. — М.: МАИ, 2005. — 632 с.
8. Лобанов И.Е. Моделирование интенсифицированного теплообмена в трубах с относительно высокими турбулизаторами // Вестник машиностроения. — 2011. — № 3. — С. 25—33.
9. Лобанов И.Е. Математическое моделирование теплообмена в трубах с турбулизаторами, а также в шероховатых трубах, на воздухе при больших числах Рейнольдса // Отраслевые аспекты технических наук. — 2013. — № 9. — С. 8—18.
10. Лобанов И.Е. Модифицированная теория гидравлического сопротивления в трубах с шероховатыми стенками с выступами переменной высоты // Московское научное обозрение. — 2013. — № 10. — С. 3—11.
11. Лобанов И.Е. Теоретическое математическое моделирование течения и теплообмена в прямых круглых трубах с турбулизаторами полукруглого поперечного сечения, а также в шероховатых трубах, на воздухе при больших числах Рейнольдса // 2019. Режим доступа: <https://ped-library.ru/1548529792>.
12. Лобанов И.Е. Теория гидравлического сопротивления в прямых круглых трубах с шероховатыми стенками // Отраслевые аспекты технических наук. — 2012. — № 4. — С. 4—13.
13. Лобанов И.Е., Калинин Э.К. Теоретическое исследование, сопоставление с экспериментом линий тока и составляющих кинетической энергии турбулентных пульсаций в вихревых структурах в трубах с турбулизаторами // Отраслевые аспекты технических наук. — 2011. — № 12. — С. 4—15.
14. Лобанов И.Е., Низовитин А.А., Парамонов Н.В. Математическое моделирование теплообмена в трубах с шероховатыми стенками на базе принципа суперпозиции полной вязкости // 12-я Международная конференция «Авиация и космонавтика — 2013». 12—15 ноября 2013 года. Москва. Тезисы докладов. — СПб.: Мастерская печати, 2013. — С. 373—375.
15. Менялкина Е.Н. Исследование влияния формы оребрения на динамику потока и сопротивление канала // Альманах современной науки и образования. — 2017. — № 4-5 (118). — С. 65—68.
16. Нестеренко А.В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха. — М.: Высшая школа, 1971. — 460 с.
17. Теплов А.В. Основы гидравлики. — Л.— М.: Энергия, 1965. — 185 с.
18. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю.А.Быстров, С.А.Исаев, Н.А.Кудрявцев, А.И.Леонтьев. — СПб: Судостроение, 2005. — 398 с.
19. Эффективные поверхности теплообмена / Э.К.Калинин, Г.А.Дрейцер, И.З. Копп и др. — М.: Энергоатомиздат, 1998. — 408 с.
20. Smith E., Promvong P. Thermal characteristics of turbulent rib-grooved channel flows // International Communications in Heat and Mass Transfer. — 2009. — August. — V. 36 (7). — P.: 705—711. — DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.03.025.
21. Tanda G. Effect of Rib Spacing on Heat Transfer and Friction in a Rectangular Channel with 45-Deg Angled Rib Turbulators on One/Two Walls // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2011. — February. — V. 54 (54). — P.: 1081—1090. — DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.11.015.

References:

1. Dreitser G.A., Isaev S.A., Lobanov I.E. Calculation of convective heat transfer in a pipe with periodic protrusions. *Bulletin of MAI*. 2004; 11(2): 28-35 (In Russ)
2. Dreitser G.A., Isaev S.A., Lobanov I.E. Calculation of convective heat transfer in a pipe with periodically located surface flow turbulators. *High Temperature Thermal Physics*. 2005; 43(2):223-230. (In Russ)
3. Kalinin E.K., Dreitser G.A., Yarkho S.A. Intensification of heat transfer in channels. — М.: Mashinostroyeniye, 1990;208 p. (In Russ)
4. Lobanov I.E. Mathematical Modeling of Hydraulic Drag in Pipes with Rough Walls. *Engineering Physics*. 2011;10: 3—11. (In Russ)
5. Lobanov I.E. Mathematical Modeling of Hydraulic Drag in Pipes with Rough Walls Based on the Principle of Superposition of Total Viscosity. 10th International Conference "Aviation and Cosmonautics — 2011". November 8—10, 2011. Moscow. Abstracts of Papers. St. Petersburg: Masterskaya Pechati, 2011; 60—61. (In Russ)

6. Lobanov I.E. Mathematical Modeling of Hydraulic Resistance in Pipes with Rough Walls with Irregular Roughness Based on the Principle of Superposition of Total Viscosity. 11th International Conference "Aviation and Cosmonautics – 2012". November 13–15, 2012. Moscow. Abstracts. St. Petersburg: Masterskaya Pechati, 2012; 386–387. (In Russ)
7. Lobanov I.E. Mathematical Modeling of Enhanced Heat Transfer during Turbulent Flow in Channels: Diss. ... Doctor of Engineering Sciences. – Moscow: MAI, 2005: 632 p. (In Russ)
8. Lobanov I.E. Modeling of Enhanced Heat Transfer in Pipes with Relatively High Turbulators. *Bulletin of Mechanical Engineering*. 2011;3:25–33. (In Russ)
9. Lobanov I.E. Mathematical Modeling of Heat Transfer in Pipes with Turbulators, as well as in Rough Pipes, in Air at High Reynolds Numbers. *Industry Aspects of Technical Sciences*. 2013; 9: 8–18. (In Russ)
10. Lobanov I.E. Modified Theory of Hydraulic Resistance in Pipes with Rough Walls with Protrusions of Variable Height. *Moscow Scientific Review*. 2013;10: 3–11. (In Russ)
11. Lobanov I.E. Theoretical Mathematical Modeling of Flow and Heat Transfer in Straight Circular Pipes with Semicircular Cross-Section Turbulators, as well as in Rough Pipes, in Air at High Reynolds Numbers // 2019. — Available at: <https://ped-library.ru/1548529792>. (In Russ)
12. Lobanov I.E. Theory of Hydraulic Resistance in Straight Circular Pipes with Rough Walls. *Industry Aspects of Technical Sciences*. 2012; 4: 4-13. (In Russ)
13. Lobanov I.E., Kalinin E.K. Theoretical Study, Comparison with Experiment of Streamlines and Components of Kinetic Energy of Turbulent Pulsations in Vortex Structures in Pipes with Turbulators. *Industry Aspects of Technical Sciences*. 2011; 12: 4-15. (In Russ)
14. Lobanov I.E., Nizovitin A.A., Paramonov N.V. Mathematical modeling of heat transfer in pipes with rough walls based on the principle of superposition of total viscosity. 12th International Conference "Aviation and Cosmonautics - 2013". November 12-15, 2013. Moscow. Abstracts of reports. - St. Petersburg: Masterskaya Pechati, 2013; 373-375. (In Russ)
15. Menyalkina E.N. Study of the influence of fin shape on flow dynamics and channel resistance. *Almanac of modern science and education*. 2017;. 4-5 (118): 65-68. (In Russ)
16. Nesterenko A.V. Fundamentals of thermodynamic calculations of ventilation and air conditioning. — M.: Vysshaya shkola, 1971:460 p. (In Russ)
17. Teplov A.V. Fundamentals of Hydraulics. L. M.: Energiya, 1965:185 p. (In Russ)
18. Numerical Modeling of Vortex Intensification of Heat Transfer in Tube Packages. Yu.A. Bystrov, S.A. Isaev, N.A. Kudryavtsev, A.I. Leontiev. St. Petersburg: Sudostroenie, 2005: 398 p. (In Russ)
19. Effective Heat Transfer Surfaces. E.K. Kalinin, G.A. Dreitser, I.Z. Kopp, et al. M.:Energoatomizdat, 1998. 408 (In Russ)
20. Smith E., Promvonge P. Thermal characteristics of turbulent rib-grooved channel flows. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2009; August 36(7):705-711.DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.03.025.
21. Tanda G. Effect of Rib Spacing on Heat Transfer and Friction in a Rectangular Channel with 45-Deg Angled Rib Turbulators on One/Two Walls. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2011; February. 54(54):1081—1090. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.11.015.

Сведения об авторе:

Лобанов Игорь Евгеньевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ПНИЛ-204 МА, igorlobanow0@yandex.ru; ORCID 0000-0001-8421-0248

Information about the author:

Igor E. Lobanov, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, PNIL-204 MA, igorlobanow0@yandex.ru; ORCID 0000-0001-8421-0248

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов/The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 17.11.2025.

Одобрена после рецензирования/Reviced 21.12.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 22.01.2026.

От CAD к АСУП: сценарный подход к автоматизации исполнительной документации в строительстве

В.Ю. Баканин

Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет),
362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, д. 44, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка методологии и алгоритмов сценарно-ориентированной обработки типовых инженерных ситуаций для цифрового сопровождения строительных работ, направленных на преодоление информационных разрывов и повышение эффективности работы производственно-технического отдела (ПТО). **Метод.** В основе исследования лежит сценарно-ориентированный подход, реализованный в виде интегрированной надстройки к распространенным CAD-системам (на примере AutoCAD). Методология включает формальную модель $S = \langle I, P, D, A \rangle$ и трехуровневую семантическую структуру, которая превращает геометрические объекты чертежа в носители логической информации. **Результат.** Разработана и апробирована на реальных объектах программная надстройка, которая позволила систематизировать процессы оформления исполнительной документации. Внедрение системы показало снижение когнитивной нагрузки на инженеров ПТО, алгоритмическое выявление типовых несоответствий и случаев дублирования, а также повышение точности и отслеживания данных за счет визуального представления статусов работ прямо на чертеже. **Вывод.** Исследование демонстрирует, что переход от линейного документооборота к событийно-реактивной архитектуре прикладной логики, интегрированной в привычные CAD-системы, позволяет эффективно управлять неполной информацией, минимизировать риски человеческого фактора и создать основу для будущей глубокой автоматизации процессов производственно-технического сопровождения в строительстве.

Ключевые слова: цифровое сопровождение строительства, исполнительная документация, автоматизация документооборота, интеграция CAD и АСУП

Для цитирования: В.Ю. Баканин. От CAD к АСУП: сценарный подход к автоматизации исполнительной документации в строительстве. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(1):23-39. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-23-39.

From CAD to automated control system: scenario approach to automation of executive documentation in construction

V.Yu. Bakanin

North Caucasian Order of Peoples' Friendship Mining and Metallurgical Institute
(State Technological University),
44 Nikolaeva St., Vladikavkaz 362021, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the research is to develop a methodology and algorithms for scenario-oriented processing of typical engineering situations for digital support of construction works aimed at bridging information gaps and improving the efficiency of the production and technical department. **Method.** The research is based on a scenario-oriented approach implemented as an integrated add-on to common CAD systems (using AutoCAD as an example) at the level of event-driven application logic. The methodology includes a formal model $S = \langle I, P, D, A \rangle$ and a three-level semantic structure used to describe and structure the transformation of geometric

drawing objects into logical information carriers. **Result.** A software add-in has been developed and tested on real construction projects, which made it possible to systematize executive documentation workflows. The implementation of the system demonstrated a reduction in cognitive load on engineers, automatic detection of typical inconsistencies and duplication patterns, as well as improved accuracy and traceability of data through visual representation of work statuses directly on CAD drawings. **Conclusion.** The study demonstrates that the transition from linear document management to a scenario-oriented, event-driven application logic architecture, integrated into familiar CAD systems, makes it possible to effectively manage incomplete information, minimize human factor risks, and create a foundation for further development of formal scenario-based automation in construction production support.

Keywords: Digital construction support, executive documentation, document management automation, CAD-automated control system integration

For citation: V.Yu. Bakanin. From CAD to Automated Control System: a Scenario Approach to Automation of Executive Documentation in Construction. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):23-39. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-23-39.

Введение. Современная строительная отрасль сталкивается с нарастающей сложностью управления проектами, обусловленной множеством факторов: от высокой изменчивости проектных решений до несвоевременности передачи информации между участниками процесса. Одним из ключевых центров ответственности в таких условиях выступает производственно-технический отдел (ПТО), который обеспечивает оформление исполнительной документации (ИД), координирует выполнение работ и взаимодействие с техническим надзором, генподрядчиком и субподрядными организациями.

На практике ПТО вынужден действовать в условиях неполной, противоречивой или запаздывающей информации. Например, реальные границы выполнения работ могут отличаться от проектных из-за отклонений в строительстве, отсутствия необходимых материалов, ошибок исполнителей, пересмотра проектных решений. При этом цифровые инструменты, используемые на стадии проектирования (BIM, CAD), зачастую слабо связаны с задачами управления производством и оформления ИД, что приводит к информационным разрывам.

Актуальность исследования определяется необходимостью разработки такой архитектуры цифрового сопровождения, которая способна эффективно обрабатывать неполные и противоречивые данные, поддерживать инженерное принятие решений и обеспечивать автоматическую трассировку изменений. Решением выступает переход от линейного документооборота к сценарно-ориентированному сопровождению — модели, при которой каждый случай сопровождения рассматривается как типовый сценарий с возможными вариантами развития и соответствующими действиями системы.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является разработка методологии и алгоритмов сценарно-ориентированной обработки инженерных ситуаций при цифровом сопровождении строительных работ, реализуемых в виде интегрированной надстройки к существующим CAD-системам и сопряжённой с АСУП.

В отличие от специализированных BIM-решений, предлагаемый подход ориентирован на использование привычного и широко распространённого программного обеспечения, уже внедрённого в строительных организациях, и максимально адаптированного к потребностям исполнителей, сосредоточенных на производстве работ, а не на проектировании. Такой подход позволяет повысить достоверность исполнительной документации; сократить время согласования и оформления изменений; минимизировать риски человеческого фактора; обеспечить прозрачность взаимодействий между участниками строительства. Реализация предложенной методики построена на архитектуре, в которой геометрические объекты чертежа становятся носителями логической информации, роли и связей, а система — активным участником инженерных процессов. Это позволяет ПТО работать

не с наборами чертежей, а с набором сценарно-ориентированных реакций и регламентов обработки инженерных ситуаций. Исследовательская повестка в области цифрового сопровождения строительного производства формируется на пересечении трех основных направлений: регуляторных требований к исполнительной документации, теоретических основ управления производством в условиях неполной информации и практических решений по интеграции технологических систем.

Российская нормативная база создает юридическую рамку для перехода к цифровой исполнительной документации. Градостроительный кодекс РФ закрепляет требования к составу и порядку приема исполнительной документации [1], а СП 48.13330.2019 определяет организационно-технологические регламенты строительства [2]. Критическим моментом стал переход от РД-11-02-2006 Ростехнадзора к новому приказу Минстроя № 344/пр от 16.05.2023, который впервые разрешил ведение общих и специальных журналов работ в электронном виде без дублирования на бумаге [3]. С 1 сентября 2023 года электронные документы формируются в формате XML по схемам, размещенным на официальном сайте Минстроя России [4]. Дополнительную регуляторную поддержку оказывает ГОСТ Р 70108-2025, устанавливающий стандарты формирования электронной исполнительной документации с 1 октября 2025 года [5].

Строительное производство характеризуется высокой степенью неопределенности, что делает традиционные линейные модели управления недостаточными. Исследования по применению сценарного планирования в управлении строительными проектами показывают, что создание множественных сценариев развития событий позволяет эффективнее управлять рисками и принимать решения в условиях неполной информации. Современные работы по управлению неопределенностью в строительных проектах выявляют основные источники неполной информации: сложность организационных взаимоотношений, изменчивость требований заказчика, неопределенность объемов работ и временные ограничения на получение дополнительной информации [6].

Четырехэтапный процесс сценарного планирования, включающий идентификацию ключевых факторов неопределенности, разработку альтернативных сценариев, оценку их влияния и формирование адаптивных стратегий, показал эффективность в крупных инфраструктурных проектах. Применение матричных методов для построения сценариев на основе двух критических факторов неопределенности позволяет создавать практически применимые модели управления строительными рисками.

Переход «от CAD к АСУП» представляет собой комплексную задачу интеграции проектной информации с производственным планированием и учетом. Исследования демонстрируют успешные примеры CAD-ERP интеграции в дискретном производстве, где автоматическая генерация спецификаций из CAD-чертежей значительно сокращает время планирования и снижает количество ошибок. В строительстве подобная интеграция осложняется специфическими требованиями к исполнительной документации и необходимостью поддержания версионности проектных решений.

Ключевые преимущества CAD-ERP интеграции включают: сокращение времени инженерно-производственного цикла на 40-60%, уменьшение ошибок ручного ввода данных на 80-90%, улучшение управления изменениями через автоматическую синхронизацию версий, и повышение качества сотрудничества между инженерными и производственными командами. Современные решения поддерживают двунаправленную синхронизацию между проектными данными и учетными системами через использование стандартизированных форматов обмена данными. Российские работы в данном направлении сосредоточены на формализации информационных моделей и разработке XML-схем для машиночитаемого обмена данными [7]. Развитие семантических технологий открывает новые возможности для формального описания строительных процессов и автоматизации принятия решений. Онтологический подход к моделированию строительных процессов позволяет создавать машиночитаемые представления знаний о технологических последовательностях, зависимостях между работами и требованиях к качеству [8].

Исследования по семантическому обогащению BIM-моделей показывают возможности автоматического извлечения и структурирования информации из проектных документов через применение правил логического вывода и пространственно-геометрических отношений [9]. Разработанные системы семантического обогащения, такие как SeeBIM, демонстрируют точность классификации объектов до 95% при обработке сложных строительных моделей [10]. Особый интерес представляет применение онтологий для автоматизированного анализа нормативных документов в строительстве, что позволяет автоматически проверять соответствие проектных решений строительным нормам и правилам [11]. Современные подходы к семантическому обогащению включают четыре основные задачи: классификацию объектов, определение пространственных отношений, выявление функциональных зависимостей и генерацию правил логического вывода [12].

Зарубежная литература демонстрирует значительные достижения в области автоматизированного контроля прогресса строительных работ. Классическими стали работы по 4D-моделированию и автоматическому сопоставлению план-факт через лазерное сканирование и компьютерное зрение [13, 14]. 4D Augmented Reality (D4AR) подходы обеспечивают визуально-аналитический контроль выполнения работ в реальном времени через наложение плановых моделей на фотографии строительной площадки [15].

Современное направление развивается в сторону интеграции технологий лазерного сканирования с искусственным интеллектом для автоматического определения процента выполнения работ. Системы автоматического мониторинга прогресса, основанные на анализе облаков точек и компьютерном зрении, достигают точности определения готовности объектов до 90%. Такие решения позволяют не только отслеживать прогресс работ, но и прогнозировать потенциальные отклонения от графика.

Применение мобильных роботизированных платформ для непрерывного мониторинга строительных площадок обеспечивает получение актуальных данных о состоянии объектов без участия человека, что особенно важно для крупных инфраструктурных проектов [16]. Российские исследования последних лет сосредоточены на адаптации международных BIM-стандартов к отечественным нормативным требованиям и практике строительства. Исследования МГСУ демонстрируют подходы к формализации информационных моделей объектов капитального строительства и интеграции BIM с процессами технического надзора [17, 18].

Значительный вклад в развитие методологии информационного моделирования вносят работы по созданию отечественных программных решений. Разработка российских BIM-систем, таких как Renga и nanoCAD, показывает возможность создания конкурентоспособных решений для архитектурно-строительного проектирования. Анализ внедрения BIM-технологий в России показывает рост с 7% до 30% застройщиков, применяющих информационное моделирование, что свидетельствует о положительной динамике цифровизации отрасли. Исследования по созданию национальных стандартов для цифровых двойников жилых домов, проводимые под руководством ДОМ.РФ, формируют методологическую основу для массового внедрения технологий информационного моделирования в российском строительстве. Работы по автоматизации проектных работ в строительных компаниях в условиях цифровизации демонстрируют практические подходы к интеграции различных информационных систем [19]. Особое внимание уделяется разработке методов научно-технического сопровождения строительных проектов как организационной рамки для внедрения цифровых технологий.

Применение теории конечных автоматов для моделирования строительных рабочих процессов представляет относительно новое направление исследований. Конечные автоматы (Finite State Machines, FSM) позволяют формализовать состояния строительных зон и четко определить условия переходов между ними [20]. Современные исследования показывают эффективность применения FSM для управления сложными последовательностями строительных операций, особенно при оформлении исполнительной документации. При этом в настоящей работе конечные автоматы рассматриваются как смежный метод

формализации процессов; предложенный сценарный подход реализован на уровне событийно-реактивной прикладной логики без выделения самостоятельного механизма исполнения FSM. Иерархические конечные автоматы позволяют моделировать сложные рабочие процессы с вложенными состояниями, что точно отражает многоуровневую структуру строительных процессов. В рамках программного обеспечения конечные автоматы применяются для управления пользовательскими интерфейсами, протоколами связи и автоматизацией рабочих процессов, что делает их подходящими для строительных применений. Практическое применение FSM в .NET-разработке демонстрирует возможности создания устойчивых и масштабируемых систем управления строительными процессами с четко определенными состояниями и переходами.

Анализ литературы показывает значительный разрыв между достижениями в области автоматизированного управления производственными процессами и требованиями российской нормативной базы к исполнительной документации. Сценарный подход к управлению строительными процессами практически не представлен в литературе применительно к задачам производственно-технических отделов (ПТО). Большинство исследований по BIM и цифровизации строительства сосредоточены на этапе проектирования, в то время как вопросы цифрового сопровождения исполнительной документации остаются недостаточно изученными. Отсутствуют комплексные подходы к интеграции CAD-систем с АСУП через сценарные механизмы обработки неполной информации.

Настоящее исследование направлено на устранение этих разрывов путем разработки методологии сценарного цифрового сопровождения, которая учитывает специфику российских регуляторных требований, использует привычные CAD-системы как основу интеграции и обеспечивает автоматизированную поддержку принятия решений в условиях неполной информации.

Методы исследования. Для формализации цифрового сопровождения строительных процессов в условиях неполной информации была разработана многоуровневая методология, сочетающая сценарный подход, семантическое моделирование и инженерную автоматизацию. Основу составляет модель $S = \langle I, P, D, A \rangle$, в которой:

I - исходная информация, получаемая из чертежей, актов, заказов, нарядов;

P - критерии полноты и достоверности данных;

D - допустимые действия: подтверждение, уточнение, отклонение, автоматическое исправление;

A - алгоритмы реакции системы на типовые и нетиповые события.

Дальше мы показываем методику «в действии»: каждый прикладной сценарий - это реализация модели $S = \langle I, P, D, A \rangle$ над трёхуровневой семантической структурой (объектный $\rightarrow$ ролевой $\rightarrow$ процессный уровни). Здесь I - задействованные сущности и роли, P - состояния и переходы, D - вычисляемые данные и правила проверки, A - действия и артефакты (акты, отчёты, записи в АСУП).

Модель реализована в виде интегрированной надстройки к AutoCAD с использованием C# и .NET Framework. В апробационной версии хранение данных обеспечивается табличным ядром на базе Microsoft Excel, интегрированным через COM-интерфейс; архитектура системы предусматривает переход к СУБД SQLite на этапе промышленной эксплуатации. Архитектура построена по модульному принципу:

1. Графический уровень: объекты AutoCAD (полилинии, штриховки, блоки) получают дополнительную семантику через XData — системное расширение, хранящее параметры, роли и связи.

2. Логический уровень: каждому объекту присваивается тип, роль (например, зона выполнения, контур акта, материал) и контекст (этап работ, исполнитель, дата).

3. Сценарный уровень: обработка событий, отклонений и ситуаций реализуется через сценарии — шаблоны реакций на неполную или противоречивую информацию.

4. Уровень хранения данных: в апробационной версии реализован через табличное ядро Excel, выполняющее функции оперативной базы данных. Структура таблиц

обеспечивает хранение идентификаторов зон, их параметров, статусов и связанных документов. Архитектура ориентирована на последующий переход к СУБД SQLite для обеспечения устойчивого хранения истории изменений, версионности и синхронизации с внешними системами.

Для формализации строительных процессов в автоматизированной системе сопровождения предлагается трёхуровневая семантическая структура. Она обеспечивает увязку геометрических объектов чертежа с их функциональными ролями и процессной логикой сценариев.

1. Объектный уровень. Базовый слой модели. Каждый графический примитив в AutoCAD получает:

- уникальный идентификатор (GUID),
- геометрические характеристики (тип, границы, площадь, длина),
- атрибуты XData, закрепляющие его принадлежность к зоне или элементу строительного процесса.

Таким образом, объектный уровень служит «паспортом» каждого элемента чертежа, создавая основу для последующей семантической интерпретации.

2. Ролевой уровень. Средний слой, который определяет назначение и поведение объектов. Именно здесь реализуется классификация по пяти категориям ролей:

- Исполнительные роли (фундамент, плита, зона выполнения) — участвуют в формировании актов КС-2, подсчёте объёмов и закрытии работ.
- Контрольные роли (оси, отметки, границы этапов) — обеспечивают сопоставление с проектом и проверку условий для активирования.
- Вспомогательные роли (опалубка, временные конструкции, дополнительные зоны) — учитывают временные или дополнительные элементы, влияющие на расчёты.
- Корректирующие роли (область вычета, зона исключения, маркер дефекта, зона демонтажа) - фиксируют нарушения и иницируют сценарии корректировки.
- Документационные роли (маркер документации, элементы оформления) — используются для генерации актов, ведомостей и исполнительных схем.

Таким образом, пятиуровневая ролевая классификация наполняет ролевой уровень конкретным содержанием, задавая поведение объектов в дальнейших процессах.

Программная реализация ролевого уровня обеспечивается механизмом семантических слоёв (пример представлен на скриншоте программы – рис. 1). Каждый слой наследует свойства родительского объекта и получает суффикс роли (например, «_выполнено», «_вычет»), что позволяет однозначно идентифицировать назначение объекта в контексте строительного процесса:

```
/// <summary>
/// Создание семантического слоя с наследованием свойств
/// </summary>
public static void CreateSemanticLayer(string parentLayer, string roleSuffix)
{
    Document doc = Application.DocumentManager.MdiActiveDocument;
    Database db = doc.Database;
    using (Transaction tr = db.TransactionManager.StartTransaction())
    {
        LayerTable lt = tr.GetObject(db.LayerTableId, OpenMode.ForRead) as LayerTable;
        string newName = parentLayer + roleSuffix;
        if (!lt.Has(newName) && lt.Has(parentLayer))
        {
            LayerTableRecord parent = tr.GetObject(lt[parentLayer], OpenMode.ForRead) as LayerTableRecord;
            LayerTableRecord newLayer = new LayerTableRecord();
            newLayer.Name = newName;
            newLayer.Color = parent.Color;           // наследование цвета
        }
    }
}
```

```
newLayer.LineWeight = parent.LineWeight; // наследование толщины
```

```
lt.UpgradeOpen();
lt.Add(newLayer);
tr.AddNewlyCreatedDBObject(newLayer, true);
}
tr.Commit();
}
```

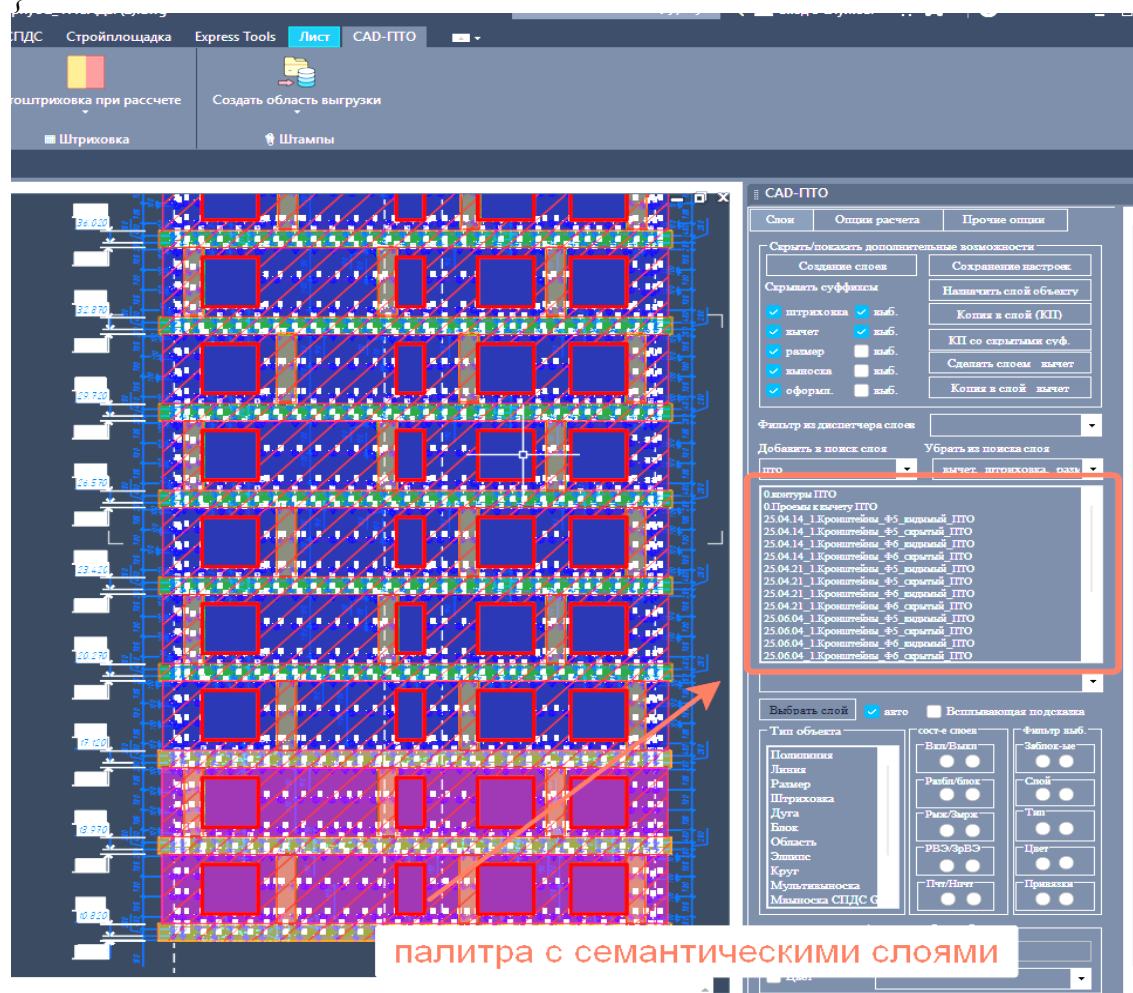


Рис. 1 – Интерфейс системы: панель управления слоями и палитра семантических слоёв с датированными версиями зон выполнения работ

Fig. 1 – System interface: layer control panel and semantic layers palette with dated versions of work execution zones

3. Процессный уровень.

Верхний слой, описывающий причинно-следственные связи и сценарии работы системы.

Примеры:

- «Если зона закрыта → сформировать акт скрытых работ/добавить объем в акт КС2».
- «Если объект имеет роль «Отделка» и изменилась несущая конструкция → пересчитать объём отделки».
- «Если пересечение ролей приводит к дублю → заблокировать закрытие и инициировать корректировку».

Процессный уровень моделируется в виде набора сценариев, структурированных по принципу «условие → переход → действие → результат».

Реализация данных реакций осуществляется через модульные алгоритмы прикладной логики, запускаемые в ответ на события пользовательского или системного уровня в CAD-среде:

- Анализ полноты: проверка, например, достаточно ли данных для оформления акта (присутствуют ли исполнитель, слой, дата, связанная модель).
- Реакция на изменение: при перемещении, удалении или модификации объекта с привязкой - инициируется сценарий (например, откат, повторное закрытие, предупреждение).
- Версионность: все действия записываются в табличное хранилище с привязкой к дате и исполнителю. Возможен откат или сравнение версий.
- Автозаполнение: параметры (даты, объемы, исполнители) могут быть автоматически перенесены из предыдущих актов или связанных зон.

Представленная методология моделирования строительного производства в условиях неполной и изменяющейся информации формирует основу сценарного подхода, применяемого в данной работе.

В рамках предложенной модели строительные зоны рассматриваются как объекты с динамическими состояниями, а изменения этих состояний описываются в виде сценариев - типовых последовательностей действий и переходов, отражающих реальные процессы на строительной площадке. Каждый сценарий представляет собой логически завершённую реакцию системы на определённый набор условий: частичное выполнение работ, замена материалов, исправления после выявленных дефектов, передача и т.д.

Таким образом, сценарий в данной системе - это прикладная реализация механизмов принятия инженерных решений, заложенных в методологии. Он включает:

- условия запуска (например, выявлено отклонение от проекта),
- цепочку переходов между состояниями объекта (например, «приостановлена» → «исправляется» → «утверждена»),
- действия системы (запрос документов, фиксация отклонения, запуск проверки),
- конечный результат (например, создание нового акта или отклонение от предыдущего).

Обсуждение результатов. Нами разработаны конкретные инженерные сценарии сопровождения, реализующие предложенную модель в виде практических кейсов. Эти сценарии формируют основу цифрового сопровождения строительного производства и являются ядром автоматизированной поддержки принятия решений в системе.

В рамках статьи сценарий трактуется не как самостоятельный исполняемый автомат, а как типовая инженерная ситуация, реализуемая через последовательность событийно-реактивных операций: фиксация события, проверка условий, выполнение алгоритмических действий и формирование результата.

Сценарии - прикладная реализация модели $S=\langle I,P,D,A \rangle$ и регламентов ПТО; они не дублируют функции CAD/BIM, а задают логическую схему сценарно-ориентированных переходов активирования/коррекций поверх геометрии и параметров (условия «если-то»).

Каждый сценарий дан в однотипной форме:

условие → переход → действие → результат, плюс краткая строка соответствия методике: $S\langle I=...,P=...,D=...,A=... \rangle$.

Это избавляет от разрывов между теорией и практикой и позволяет напрямую выгружать результат в корпоративный контур (АСУП). Разработка и внедрение сценарного подхода позволили систематизировать наиболее распространённые ситуации, с которыми сталкивается инженер ПТО при оформлении исполнительной документации в условиях неполной информации. Программная поддержка сценариев обеспечивается инфраструктурой системы: механизмом семантических слоёв, алгоритмами проверки пересечений и синхронизацией с табличным хранилищем. Сценарии 1–13 имеют программную поддержку базовых операций; сценарии 14–16 отражают направления дальнейшего развития.

1. Сценарий поэтапного выполнения (частичное закрытие зоны).

Описание: Строительно-монтажные работы часто выполняются неравномерно — отдельные зоны, участки или этажи сдаются поэтапно. При этом оформление акта возможно лишь при точной фиксации факта выполнения.

Автоматизация: В системе реализована алгоритмическая проверка пересечений зон: при повторном предъявлении участка, уже закрытого в предыдущем акте, система автоматически предупреждает и предлагает скорректировать границу. При необходимости создаётся новая зона с привязкой к исполнителю и датой.

Пример: Подрядчик выполнил 40% работ по монтажу кронштейнов навесного вентилируемого фасада. Система позволяет оформить частичный акт и зафиксировать объём. При втором предъявлении автоматически проверяется, не перекрывает ли новая зона уже закрытую.

2. Сценарий уточнения или смещения зоны выполнения.

Описание: часто исполнитель ошибается в привязке, и зона фактического выполнения не совпадает с проектной. Это требует гибкой корректировки без потери связей с другими объектами.

Автоматизация: при изменении геометрии или координат зоны система отслеживает привязки (например, оси, этажи, границы) и предлагает обновить связанные данные. Изменения записываются в историю с возможностью отката.

Пример: Исполнитель предъявил зону на 2 метра правее проектной. После ручного сдвига полилинии система пересчитывает объём, сохраняет предыдущую версию и добавляет комментарий в журнал изменений.

3. Сценарий цепной корректировки.

Описание: Изменение одного элемента проекта (например, замена стены) часто влечёт за собой каскадные изменения — отделки, примыкания, проёмы.

Автоматизация: используется система зависимостей: объекты связаны логически (например, отделка принадлежит перегородке). При изменении объекта инициируется сценарий проверки зависимых элементов, с возможностью обновления, удаления или пометки «требуется проверки».

Пример: Перенос перегородки вызывает смещение всех отделочных покрытий, связанных с ней. Система автоматически предлагает пересчитать объёмы и отследить изменения в связанных актах.

4. Сценарий замены материалов.

Описание: При возникновении логистических сбоев или проектных изменений материалы могут быть заменены. При этом важно сохранить корректность спецификаций и объёмов.

Автоматизация: Объект получает новый параметр материала, пересчитываются стоимость и параметры, создаётся связанный комментарий. В акте система отображает как первоначальный, так и заменённый материал.

Пример: Из-за отсутствия ГКЛ 12,5 мм подрядчик использует ГКЛ 9,5 мм. Система фиксирует замену, предлагает указать основание (ППР, распоряжение, РД) и пересчитывает массу и стоимость работ.

5. Сценарий исправления ошибок подрядчика.

Описание: Подрядчик мог неверно указать зону или выполнить работы в непредусмотренном месте. При этом требуется сохранить факт выполнения и исключить дублирование.

Автоматизация: При повторной попытке предъявить уже оформленную зону система выдает предупреждение и предлагает два варианта: откат или регистрация новой зоны с меткой «коррекция подрядчика».

Пример: Подрядчик второй раз предъявляет ту же зону. Система предлагает сравнение и выводит различия между зонами. В случае подтверждённой ошибки зона сохраняется, но маркируется как исправление с возможностью фильтрации при формировании ИД.

6. Сценарий отката и версионирования.

Описание: При изменении решения ПТО или ошибке в оформлении может потребоваться отменить выполненное действие.

Автоматизация: Система ведёт историю всех действий: изменения, автор, дата, зона. Доступна кнопка «Откат», возвращающая состояние к предыдущей версии.

Пример: После закрытия акта технадзор требует изменения границы. Инженер ПТО нажимает «Откат» — система восстанавливает прежнюю геометрию, пересчитывает объёмы и сохраняет историю изменения.

7. Сценарий послойного (иерархического) закрытия работ.

Описание: При оформлении актов освидетельствования скрытых работ (АОСР) требуется соблюдать строгую последовательность: каждый последующий слой (например, стяжка, гидроизоляция, утепление) может быть принят только при наличии подписанного акта на предыдущий. Нарушение порядка приводит к нарушению регламентов СНИП и отклонению документов технадзором.

Автоматизация: В системе реализована проверка иерархии: каждый объект с ролью «слой» содержит параметр «уровень последовательности». При попытке закрыть верхний слой (например, финишную отделку) система автоматически проверяет, подписаны ли предыдущие (гидроизоляция, стяжка). При отсутствии подписанного акта система блокирует оформление и выводит уведомление.

Пример: Инженер пытается оформить акт на чистовую отделку. Система выявляет, что по слою «штукатурка» нет закрытого акта и выдаёт предупреждение: «Невозможно оформить. Предыдущий слой не закрыт».

8. Сценарий предотвращения дублирования объёмов.

Описание: Подрядчики нередко по ошибке (или намеренно) дважды предъявляют один и тот же объём, зону или элемент. Это приводит к завышению объёмов, конфликтам и финансовым рискам.

Автоматизация: При каждой попытке оформления акта система анализирует геометрию зоны и пересекающиеся элементы. В случае наложения более чем на 3% с ранее закрытой зоной система блокирует действие, предлагает сравнение и требует явного подтверждения ПТО. Также фиксируется история: кто и когда пытался продублировать зону.

Пример: Подрядчик оформляет акт на участок 101–103, ранее частично закрытый. Система выдаёт: «Обнаружено пересечение с ранее закрытым участком (акт № 34 от 01.06.2025). Подтвердить повторное закрытие?»

9. Сценарий закрытия по зонам ответственности (разделение между подрядчиками).

Описание: на крупных объектах зоны строительных работ могут пересекаться по вертикали, горизонтали или времени, при этом ответственность за выполнение несут разные подрядчики. Важно исключить двойное оформление и точно зафиксировать исполнителя по каждой зоне.

Автоматизация: каждой зоне выполнения присваивается параметр «исполнитель». При формировании акта система проверяет, принадлежит ли зона текущему подрядчику. Если зона уже частично закрыта другим исполнителем, система предлагает выделить только оставшиеся фрагменты. Поддерживается также «пограничный режим» — с возможностью согласованного деления зон по протоколу.

Пример: подрядчик А пытается закрыть зону, ранее частично выполненную Подрядчиком Б. Система выделяет доступный остаток и выводит сообщение: «Часть зоны уже оформлена другим исполнителем. Выделен допустимый объём: 8.2 м²».

10. Сценарий повторной приёмки после замечаний (корректирующий цикл).

Описание: после предъявления зоны могут быть выявлены замечания (например, техническим надзором). Повторная приёмка должна быть зафиксирована, без потери информации о первичной попытке и замечаниях.

Автоматизация: система сохраняет первую версию акта с меткой «с замечаниями» и фиксирует дату/основание возврата. После повторного предъявления создаётся версия № 2, связанная с первой. В журнале видно: «Первичное предъявление – 02.07.2025, замечания: “отсутствует анкеровка”, повторное – 10.07.2025, принято».

Пример: подрядчик предъявил акт, но получил замечание. После доработки предъявляет повторно. Система автоматически связывает акты, показывает историю замечаний и результат повторной проверки.

11. Сценарий частичного отката (отмена части акта).

Описание: бывают случаи, когда нужно отменить только отдельные участки или позиции из ранее оформленного акта (например, выявлена ошибка в одной зоне, остальные приняты корректно).

Автоматизация: система позволяет выбрать, какие геометрические элементы или строки акта следует отменить. Создаётся новая версия акта с пометкой «частично откорректирован», отменённые данные сохраняются в архиве и недоступны для повторного использования без явного подтверждения.

Пример: в акте на 5 зон одна была ошибочно включена. Инженер ПТО выбирает её и выполняет частичный откат. Система формирует версию 1.1, в которой остались только 4 корректные зоны.

12. Сценарий контрольного сравнения между этапами (ревизия).

Описание: для управления качеством и соблюдения технологии необходимо выполнять контрольные сравнения между этапами — что изменилось, какие зоны были отклонены, что предъявлено без соответствия.

Автоматизация: система сравнивает состояния объектов между двумя выбранными временными точками или версиями актов. Формируется отчёт: добавленные, удалённые, изменённые зоны. Выявляются пересечения, несогласованности и потенциальные риски.

Пример: перед сдачей объекта ПТО запускает сравнение между версией акта от 01.07.2025 и 20.07.2025. Система выводит: «Добавлено – 3 зоны (42 м²), откорректировано – 1 зона, удалено – 0».

13. Сценарий выявления незавершённых зон («дыры на чертеже»).

Описание: в процессе строительства и оформления актов могут образовываться зоны, которые забыли закрыть — особенно в случаях с поэтапным выполнением или переменной подрядчиков. Эти «дыры» не фиксируются ни в одной ИД и становятся источником проблем при итоговой сдаче объекта.

Автоматизация: система строит карту покрытия — визуализирует все закрытые зоны с учётом их статуса и исполнителя. Затем анализирует оставшиеся участки чертежа, не попавшие ни в одну зону. Такие участки подсвечиваются как «незавершённые» и включаются в отдельный отчёт.

Пример: на плане благоустройства обнаружено, что 7% площади не закрыто ни одним актом. Система формирует список незакрытых зон по слоям и предлагает направить уведомление ответственному подрядчику.

14. Сценарий фотофиксации и мультимедиа-подтверждения.

Описание: для подтверждения выполнения работ, особенно по скрытым или конструктивно важным элементам, требуется визуальное подтверждение — фото, видео, сканы. В идеале — привязанные к конкретным зонам.

Автоматизация: в каждый объект (зону) можно прикрепить медиафайлы — до/после выполнения. Система позволяет их просматривать в окне CAD или в связанной карточке. Поддерживается экспорт фото в PDF-приложения к акту.

Пример: зона стяжки содержит три фото: до армирования, во время заливки, после. При проверке акт автоматически подтягивает изображения, а технадзор получает ссылку на визуальный архив.

15. Сценарий принудительного закрытия (override).

Описание: в ряде ситуаций требуется оформить акт в обход логики сценариев — например, при распоряжении руководства, временной сдаче или договорённости с заказчиком. Это критическая точка, требующая учёта, но не блокировки.

Автоматизация: система позволяет выполнить принудительное закрытие зоны, даже если нарушены сценарные правила (не закрыт предыдущий слой, нет фотофиксации и т.д.). Однако в этом случае автоматически запрашивается основание (ссылка на распоряжение, приказ) и ФИО ответственного, зафиксированное в истории изменений. Такие действия помечаются флагом «override» и попадают в отдельный журнал для внутреннего контроля.

Пример: ПТО оформляет акт на зону без фото и закрытого подстилающего слоя. Система требует ввести: «Распоряжение №15-РП от 03.08.2025. Ответственный: Гл. инженер Иванов». В журнале видно, что акт был оформлен с нарушением, но с разрешением.

16. Сценарий привязки паспортов качества и превращения чертежа в электронный журнал работ.

Описание: в практике сопровождения строительства требуется не только фиксировать геометрию и объёмы, но и прилагать сертификаты, паспорта качества, протоколы лабораторных испытаний, подтверждающие соответствие материалов и выполненных работ требованиям нормативных документов. Обычно эти документы ведутся в бумажном виде и слабо связаны с графическим планом, что затрудняет контроль и верификацию.

Автоматизация: в системе реализована функция связывания каждого чертёжного объекта (зоны, блока, элемента конструкции) с прикреплёнными документами — паспортами, заключениями, протоколами. Поддерживаются форматы PDF, DOC(X), XLS(X), изображения и отсканированные копии. Все документы группируются по зонам и датам и отображаются в виде вложений в «электронном журнале работ».

На уровне интерфейса пользователь видит: чертёж с зонами работ; список прикреплённых документов по каждой зоне; дату, кем приложено, номер и статус (подписан, на согласовании и т.п.). Эта логика превращает чертёж в живой электронный журнал работ, где каждый участок содержит не только графику, но и весь необходимый пакет сопровождающей документации.

Пример: зона «Монолитная плита 1Э-1» имеет привязанные паспорта бетона М300, протокол испытаний кубов, акт скрытых работ. Все они отображаются в окне объекта и автоматически входят в выгрузку ИД. Всё прослеживается в одном окне — без поиска в бумажных архивах.

Безопасность и трассировка: каждое прикрепление фиксируется в журнале: кто, когда, какой файл добавил, был ли он заменён, а также ссылкой на исходное местоположение (например, сетевое хранилище или СЭД).

В соответствии с ГОСТ Р 59853-2021, АСУП определяется как автоматизированная система, предназначенная для управления производственно-хозяйственной деятельностью предприятия. В предлагаемом исследовании надстройка САД рассматривается как операционный контур ПТО, который обеспечивает поставку в АСУП проверенных данных об объёмах и актах, устраняя информационный разрыв между исполнительной документацией и корпоративным уровнем учёта. Структура надстройки САД выступает связующим между графической моделью строительного процесса и корпоративной АСУП. Система фиксирует исполнительные данные на уровне строительных зон, актов и объёмов, формирует структурированные регистры и обеспечивает их передачу в АСУП. Такая архитектура позволяет устранить ключевой информационный разрыв: от локальных решений инженеров ПТО к централизованному учёту и финансовому контролю.

Интеграция реализована поэтапно:

1. Операционный уровень — формирование электронных актов, ведомостей объёмов и исполнительных схем в среде AutoCAD с сохранением семантических связей и историей версий.

2. Промежуточный уровень — структурирование данных в табличном ядре Excel с возможностью экспорта в форматы CSV, XML. Архитектура предусматривает переход к реляционной СУБД (SQLite) на этапе масштабирования системы.

3. Корпоративный уровень (АСУП) — приём данных в существующие ERP/учётные системы (1C, SAP и др.), где они становятся основанием для расчётов, оплаты и план-факт анализа.

Такой подход имеет ряд преимуществ: универсальность — использование открытых форматов позволяет интегрироваться с различными АСУП без модификации ядра системы; масштабируемость - на начальных этапах возможен обмен через стандартные файлы, на более зрелых - переход к API-интеграции и онлайн-синхронизации; прозрачность - данные, закреплённые за объектами чертежа, однозначно трассируются до корпоративных регистров, что исключает дублирование и ручные ошибки.

Передача данных в табличное хранилище осуществляется через COM-интерфейс Microsoft Excel (реализация пользовательского интерфейса представлена на рис. 2).

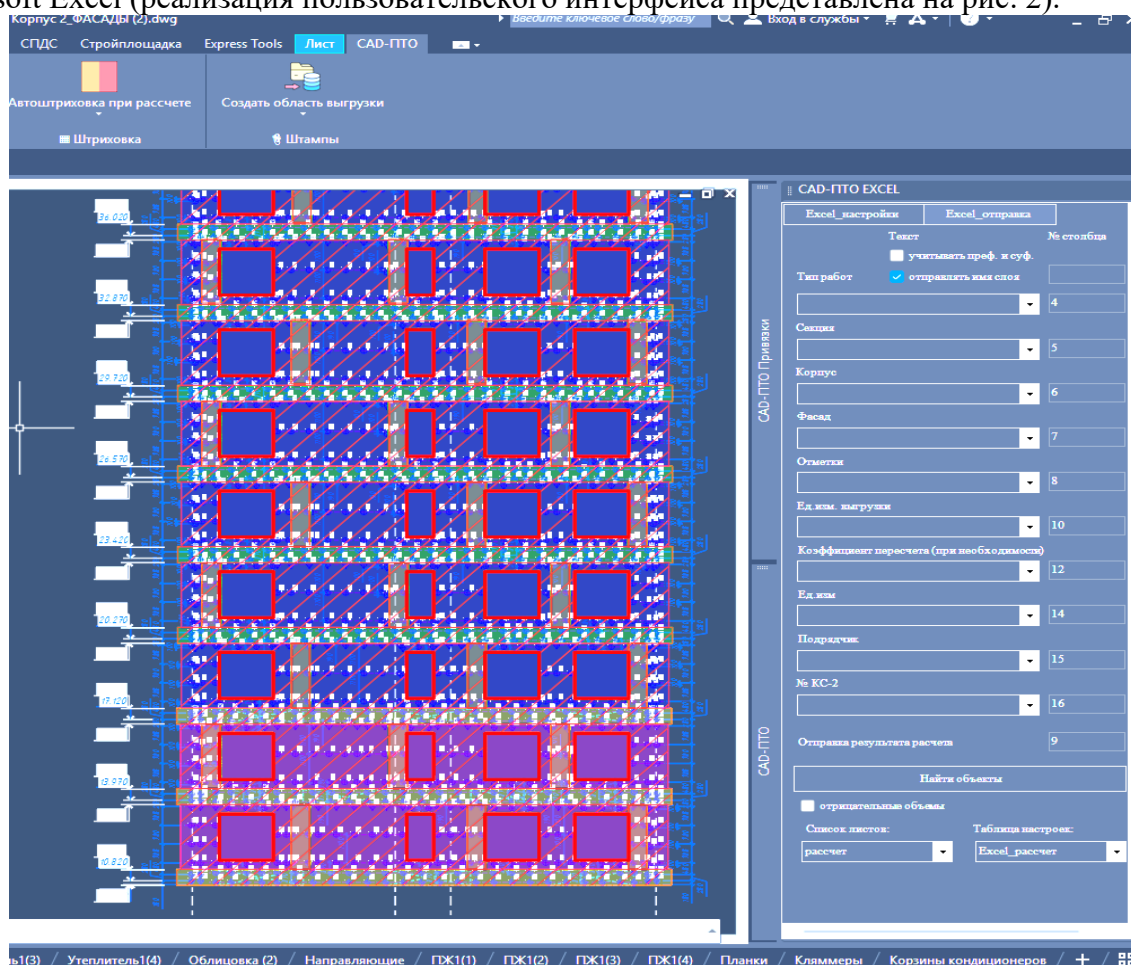


Рис. 2 – Панель интеграции с табличным хранилищем Excel: настройка соответствия параметров зон и столбцов таблицы

Fig. 2 – Excel table storage integration panel: setting up the mapping of zone parameters and table columns

С научной точки зрения, данная интеграция демонстрирует переход от линейного документооборота к сценарной модели сопровождения, где информация о ходе работ не только фиксируется, но и динамически синхронизируется с корпоративным уровнем управления. Это создаёт основу для применения методов интеллектуального анализа данных, прогнозирования сроков и оптимизации ресурсов в рамках АСУП.

Алгоритм сопоставляет значения по ключевому столбцу и записывает результаты в целевые ячейки, реализуя стратегию «последнее изменение имеет приоритет»:

/// <summary>

```
/// Передача данных из CAD в Excel с сопоставлением по ключу
/// </summary>
private void SyncToExcel(Worksheet sheet, DataGridView grid,
    int keyCol, int targetCol, int startRow, int endRow)
{
    var selectedValues = grid.SelectedCells
        .Cast<DataGridViewCell>()
        .Select(c => c.Value?.ToString())
        .Where(v => !string.IsNullOrEmpty(v))
        .Distinct().ToList();
    Range keyRange = sheet.Columns[keyCol];
    foreach (Range cell in keyRange.Cells)
    {
        if (cell.Row < startRow || cell.Row > endRow) continue;
        if (selectedValues.Contains(cell.Value?.ToString()))
        {
            var row = grid.Rows.Cast<DataGridViewRow>()
                .FirstOrDefault(r => r.Cells[keyCol-1].Value?.ToString() == cell.Value?.ToString());
            if (row != null)
                sheet.Cells[cell.Row, targetCol].Value = row.Cells[targetCol-1].Value;
        }
    }
}
```

Разработанная надстройка была апробирована в условиях реального строительного производства на объектах гражданского и инфраструктурного назначения в течение 2024–2025 годов. Основное внимание уделялось эффективности сопровождения исполнительной документации, удобству для инженеров ПТО и скорости реакции на изменения в проекте и на стройплощадке. Во всех случаях ПТО использовал AutoCAD в качестве базовой платформы и CAD-настройку — в качестве инструмента цифрового сопровождения ИД.

Основные результаты:

- Переход на «визуальное сопровождение» (работа через чертёж, а не Excel) снижает когнитивную нагрузку на инженера ПТО.
- Инженеры быстрее ориентируются в зонах, этапах и материалах при наличии сценарных подсказок и статусов в графике.

Результаты экспериментальной апробации подтвердили, что внедрение сценарного подхода в процессы производственно-технического сопровождения строительства позволяет не только ускорить оформление исполнительной документации, но и повысить её точность, прослеживаемость и соответствие требованиям нормативного контроля.

Наиболее значимыми эффектами стали: алгоритмическое выявление типовых несоответствий и случаев дублирования при оформлении актов; снижение зависимости от человеческого фактора при подсчётах и проверке зон; единое «пространство на чертеже» как источник истины: статус каждой зоны виден прямо на схеме; данные вводятся на объекте, а не в разрозненных таблицах - забыть или пропустить практически невозможно; не нужно вручную сверять акты и искать зоны - открыл чертёж и сразу видно, что закрыто, что в работе и что требует корректировки. Несмотря на положительные результаты, система имеет ряд ограничений. Сценарный подход реализован на уровне событийно-реактивной прикладной логики и не включает самостоятельного сценарного движка: сценарии трактуются как типовые инженерные ситуации, а не исполняемые автоматы.

Формальная модель $S=\langle I, P, D, A \rangle$ используется как методологический инструмент, обеспечивающий целостность описания процессов ПТО; декларативная спецификация сценариев в полном объёме выходит за рамки настоящей работы. Апробация выполнена на ограниченном наборе объектов и ориентирована на задачи оформления исполнительной документации; распространение подхода на смежные контуры (планирование, финансовый

контроль, межсистемный документооборот) рассматривается как направление дальнейшего развития.

Помимо методологических, система имеет ряд технических ограничений:

- отсутствует автоматическая связка с корпоративными АСУП (обмен идёт через таблицы и файлы);
- некоторые сценарии требуют ручного подтверждения или запуска (например, повторная приёмка или override);
- хранение данных реализовано через Excel, что ограничивает производительность при больших объёмах (более 10 000 записей) и затрудняет многопользовательский доступ

Это объясняется стратегией поэтапного развития: архитектура системы изначально проектировалась как лёгкая надстройка, не требующая глубокой ИТ-инфраструктуры и пригодная к развёртыванию в любом отделе ПТО без привлечения программистов.

На следующем этапе развития системы планируется:

1. Расширение сценарной библиотеки: добавление сценариев под подрядные договоры, смежников, проверки объёмов в связке с базой цен.
2. Углубление интеграции с документооборотом: автозаполнение шаблонов PDF-актов, взаимодействие с СЭД, экспорт в архивы исполнительной документации.
3. Поддержка нескольких версий проекта: отслеживание изменений проектных решений и автоматическое сравнение с фактическими зонами на чертеже.
4. Полуавтоматическое формирование актов: система будет предлагать готовый акт на основании выделенных зон и исторических данных.
5. Интеграция в мобильные решения: фиксация фото и комментариев с планшета или смартфона, синхронизируемая с чертежом.
6. Переход от чертежа к цифровому регистру: наращивание роли чертежа как основного носителя связей, документов и истории изменений.

Методологически проект демонстрирует реализацию инженерной автоматизации в условиях неполной информации, что ранее применялось лишь в стратегическом управлении. В строительстве это означает переход от линейного документооборота к сценарному, ситуационно-чувствительному сопровождению, в котором САД-среда становится не только инструментом графики, но и ядром для принятия решений.

Вывод. В статье представлена методология и архитектура цифрового сопровождения строительных работ в условиях неполной информации, основанная на сценарном подходе и реализованная на уровне событийно-реактивной прикладной логики в виде интегрированной надстройки к САД-системе.

Разработанная система включает:

- семантическую модель объектов чертежа с привязкой к ролям, параметрам и зонам ответственности;
- набор типовых сценарно-ориентированных инженерных ситуаций, охватывающих реальные процессы ПТО (поэтапное выполнение, корректировки, повторные предъявления, откаты и др.): поэтапное выполнение, корректировки, повторные предъявления, дубли, откаты, фотофиксация и паспорта;
- механизмы автоматического анализа чертежа, контроля зон, генерации ИД и выгрузки данных для внешних систем учёта.

Внедрение системы не требует глубокой ИТ-инфраструктуры и может быть реализовано в ПТО без привлечения программистов. Разработка демонстрирует, что переход от линейной логики документооборота к гибкой сценарной архитектуре позволяет качественно повысить эффективность работы инженерных служб, создать основу для будущей автоматизации активирования и подготовки отчётности, а также приблизить процессы ИД к формату «электронного журнала строительства».

Полученные результаты могут быть использованы как основа для дальнейшего научного исследования, а также внедрения в реальную строительную практику на уровне генподрядных и подрядных организаций. Единый формат S(I,P,D,A) для всех сценариев

обеспечил прямую связку методологии с практикой и позволил без доработок интегрировать результаты в регистры АСУП.

Библиографический список:

1. Градостроительный кодекс Российской Федерации: федеральный закон от 29.12.2004 № 190-ФЗ.
2. СП 48.13330.2019. Организация строительства. Актуализированная редакция СНиП 12-01-2004: национальный стандарт Российской Федерации: утв. приказом Минстроя России от 26.12.2019 № 861/пр. Москва: Стандартинформ, 2019. 38 с.
3. Приказ Минстроя РФ от 16.05.2023 № 344/пр «Об утверждении требований к составу и ведению исполнительной документации».
4. Официальный сайт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/>.
5. ГОСТ Р 70108-2025. Исполнительная документация в строительстве в электронном виде. Общие требования: национальный стандарт Российской Федерации: утв. и введ. в действие приказом Росстандарта от 31.03.2025 № 1696-ст. Москва: Стандартинформ, 2025. Дата введения 2025-10-01.
6. Makesh A.P. Analysis of uncertainty in a construction project //YMER Digital. 2021. Vol. 20. N 12. P. 324-331.
7. Волков С.А., Хрипко Т.В. Применение XML-схем при формировании структуры информационной модели объектов капитального строительства // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 11. С. 1570-1583. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1570-1583.
8. Getuli V. Ontologies for Knowledge modeling in construction planning: Theory and application. Open Access Publishing, 2022.
9. Xue F., Wu L., Lu W. Semantic enrichment of Building and City Information Models: a ten-year review // Advanced Engineering Informatics. 2021. Vol. 47. Art. 101245. DOI: 10.1016/j.aei.2020.101245.
10. Belsky M., Sacks R., Brilakis I. Semantic enrichment for building information modeling // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2017. Vol. 31. N 4. P. 261-274. DOI: 10.1111/mice.12128.
11. Kabzhan Z., Shakhnovich A., Gorshkov S., Bilinskis E. Semantic and ontology-based analysis of regulatory documents for construction industry digitalization // Frontiers in Built Environment. 2025. Vol. 11. Art. 1575913. DOI: 10.3389/fbuilt.2025.1575913.
12. Zhang P., Chen K., Liu J. A framework for generic semantic enrichment of BIM models // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2023. Vol. 38. N 15. P. 2045-2063. DOI: 10.1111/mice.12964.
13. Turkan Y., Bosché F., Haas C.T., Haas R. Automated progress tracking using 4D schedule and 3D sensing technologies //Automation in Construction. 2012. Vol. 22. P. 414-421. DOI: 10.1016/j.autcon.2011.10.003.
14. Volk R., Stengel J., Schultmann F. Building Information Modeling (BIM) for existing buildings: literature review and future needs//Automation in Construction. 2014. Vol. 38. P. 109-127. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.10.023.
15. Golparvar-Fard M., Peña-Mora F., Savarese S. Application of D4AR — a 4-Dimensional Augmented Reality model for automating construction progress monitoring data collection, processing and communication // ITcon. 2009. Vol. 14. P. 129-153.
16. S. Halder., K. Afsari. Robots in Inspection and Monitoring of Buildings and Infrastructure: A Systematic Review //A Systematic Review. Appl. Sci. 2023, Vol. 13, N 4. Art. 2304. DOI: 10.3390/app13042304.
17. Липидус А.А. Научно-техническое сопровождение изысканий, проектирования и строительства как обязательный элемент достижения требуемых показателей проекта // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 11. С. 1428-1437. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.11.1428-1437.
18. Каракозова И.В., Мозговой А.В., Собина Е.В., Шадрин Г.В. Исследование подготовительных работ для использования BIM-технологий на примере проектирования медицинских организаций // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 1. С. 100-111. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.100-111.
19. Санталова М.С., Соклакова И.В., Горлов В.В., Муза Ю.А. Автоматизация проектных работ в строительной компании в условиях цифровизации // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2022. № 4. С. 156-167.
20. Martinez-Rojas M., Marin N., Vila M.A. The role of information technologies to address data handling in construction project management //Journal of Computing in Civil Engineering. 2016. Vol. 30. N 4. P. 04015064. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000538.

References:

1. Urban Planning Code of the Russian Federation: Federal Law No. 190-FZ of December 29, 2004. (In Russ)
2. SP 48.13330.2019. Organization of construction. Updated version of SNiP 12-01-2004: National standard of the Russian Federation: approved by Order of the Ministry of Construction of Russia dated December 26, 2019 No. 861/pr. Moscow: Standartinform, 2019:38 p. (In Russ)
3. Order of the Ministry of Construction of the Russian Federation dated 05/16/2023 No. 344/pr "On approval of requirements for the composition and maintenance of executive documentation." (In Russ)
4. The official website of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/>. (In Russ)

5. GOST R 70108-2025. Executive documentation in construction in electronic form. General requirements: national standard of the Russian Federation: approved and introduced effective by Order of Rosstandart dated 03/31/2025 No. 1696-art. Moscow: Standartinform, 2025. Date of introduction 2025-10-01. (In Russ)
6. Makesh A.P. Uncertainty analysis in a construction project. *YMER Digital*. 2021;20(12):324-331.
7. Volkov S.A., T. Khripko.V. Application of XML schemas in the formation of the structure of the information model of capital construction facilities. *Bulletin of MGSU*. 2020;15(11):1570-1583. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1570-1583. (In Russ)
8. Getuli V. Ontologies for knowledge modeling in construction planning: theory and application. Open Access publication, 2022.
9. Xue F., Wu L., Lu U. Semantic enrichment of information models of buildings and cities: a ten-year review. *Advanced engineering computer science*. 2021;47. Article 101245. DOI: 10.1016/j.aei.2020.101245.
10. Belsky M., Sachs R., Brilakis I. Semantic enrichment for building information modeling. *Computer-aided design of buildings and infrastructure*. 2017;31(4): 261-274. DOI: 10.1111/mice.12128.
11. Kabzhan Z., Shakhnovich A., Gorshkov S., Bilinskis E. Semantic and ontological analysis of regulatory documents on digitalization of the construction industry. *Boundaries in the construction environment*. 2025;11. Article 1575913. DOI: 10.3389/fbuil.2025.1575913.
12. Zhang P., Chen K., Liu J. A framework for generalized semantic enrichment of BIM models. *Computer-aided design of buildings and infrastructure*. 2023;38(15):2045-2063. DOI: 10.1111/mice.12964.
13. Turkan Yu., Boche F., Haas K.T., Haas R. Automated tracking of work progress using 4D planning and 3D sensing technologies. *Automation in construction*. 2012;22:414-421. DOI: 10.1016/j.autcon.2011.10.003.
14. Volk R., Stengel J., Shultman F. Building Information Modeling (BIM) for existing buildings: literature review and future needs. *Automation in construction*. 2014;38:109-127. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.10.023.
15. Golparvar-Fard M., Pena-Mora F., Savarese S. Application of D4AR— a 4-dimensional augmented reality model for automating the collection, processing and transmission of construction progress monitoring data. *ITcon*. 2009;14:129-153.
16. S. Halder, K. Afsari. Robots in the inspection and monitoring of buildings and infrastructure: A Systematic Review. *A Systematic Review. Appendix Sci*. 2023;13(4.) Article 2304. DOI: 10.3390/app13042304.
17. Lapidus A.A. Scientific and technical support of surveys, design and construction as a mandatory element of achieving the required project indicators. *Bulletin of MGSU*. 2019;14(11):1428-1437. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.11.1428-1437. (In Russ)
18. And Karakozova.V., And Mozgovoy.V., Sobina E.V., Shadrina G.V. A study of preparatory work for the use of Bim technologies using the example of designing medical organizations. *Bulletin of MGSU*. 2020; 15(1):100-111. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.100-111. (In Russ)
19. Santalova M.S., Soklakova I.V., Gorlov V.V., Muza Yu.A. Automation of design work in a construction company in the context of digitalization. *Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and architecture*. 2022; 4.:156-167. (In Russ)
20. Martinez-Rojas M., Marin N., Vila M.A. The role of information technology in solving data processing problems in construction project management. *Journal of Computing Technology in Civil Engineering*. 2016.;30(4): 04015064. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000538.

Сведения об авторе:

Виталий Юрьевич Баканин, аспирант, кафедра компьютерного моделирования и автоматизации проектирования; mail@vitalijb.ru

Information about the author:

Vitaly Yu. Bakanin, Postgraduate student, Department of Computer Modeling and Design Automation; mail@vitalijb.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов/The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 20.11.2025.

Одобрена после рецензирования/Reviced 29.12.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 26.01.2026.

Классификация линий связи и аппаратных средств как основа для выявления несанкционированных подключений

С.С. Васичкин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций

им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,

193232, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22, к. 1, Россия

Резюме. Цель. В статье рассматривается задача автоматизированного выявления подключений к проводным линиям связи, что особенно актуально в условиях роста угроз скрытого доступа. **Метод.** Исследование основано на методах выявления, идентификации, классификации угроз нарушения информационной безопасности объектов. **Результат.** Предложена расширенная классификация линий связи и подключаемых устройств с учётом их сигнальных характеристик. Проанализированы ограничения существующих методов контроля, включая импульсную рефлектометрию и частотно-параметрические подходы. Разработана структура классификатора, позволяющая формировать эталонные сигнальные профили и выявлять отклонения от них в режиме реального времени. Подход повышает точность удалённой идентификации, снижает влияние человеческого фактора и создаёт основу для интеллектуальных систем мониторинга. Рассмотрена устойчивость классификации к внешним помехам и изменению параметров среды. **Вывод.** Результаты могут быть применены в системах автоматического контроля целостности каналов связи.

Ключевые слова: линии связи, классификация устройств, сигнальные характеристики, рефлектометрия, контроль подключений, информационная безопасность

Для цитирования: С.С. Васичкин. Классификация линий связи и аппаратных средств как основа для выявления несанкционированных подключений. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(1):40-48. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-40-48

Classification of communication lines and hardware devices as a basis for Detecting Unauthorized Connections

S.S.Vasichkin

M.A. Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,

22 Bolshevikov Ave., build. 1, St Petersburg 193232, Russia

Abstract. Objective. This article addresses the problem of automated detection of connections to wired communication lines, which is relevant in the context of increasing threats of hidden access. **Method.** The study is based on methods of detection, identification, classification of threats to information security of objects. **Result.** An extended classification of communication lines and connected devices is proposed, taking into account signal characteristics. The limitations of control methods, pulse reflectometry and frequency-parametric approaches are analyzed. A classifier structure has been developed that allows for the formation of reference signal profiles and the identification of deviations in real time. The approach improves the accuracy of remote identification, reduces the influence of the human factor, and creates the basis for intelligent monitoring systems. The robustness of the classification against environmental changes and interference is also discussed. **Conclusion.** The results may be applied in automated control of communication line integrity.

Keywords: communication lines, device classification, signal characteristics, reflectometry, connection control, information security

For citation: S.S. Vasichkin. Classification of communication lines and hardware devices as a basis for Detecting Unauthorized Connections. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):40-48. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-40-48

Введение. Современные информационные системы всё чаще сталкиваются с угрозами, направленными не только на программное обеспечение и каналы логического взаимодействия, но и на физическую инфраструктуру связи. В частности, проводные линии остаются уязвимыми элементами в архитектуре защищённых коммуникаций. Несмотря на распространённость средств криптографической защиты, факт физического подключения стороннего устройства способен обойти логические барьеры и скомпрометировать всю систему. Это особенно критично для объектов с высокими требованиями к информационной безопасности - от промышленных сетей и банковской инфраструктуры до систем государственной важности.

Проблема несанкционированных подключений остаётся одной из наименее автоматизированных задач в сфере обеспечения безопасности сетей. При этом изменения физических характеристик линии связи, вызванные появлением нового устройства, фиксируемы и могут служить признаком потенциального вторжения. Однако на практике применение традиционных методов анализа, таких как импульсная рефлектометрия или частотный контроль, сопряжено с рядом ограничений: низкой чувствительностью, зависимостью от длины линии, сложностью интерпретации и невозможностью классификации типа устройства без участия специалиста. В современных условиях становится актуальной задача создания интеллектуальных систем, способных в реальном времени обнаруживать факт подключения нового оборудования на основе анализа сигнальных характеристик линии [1]. Для построения таких систем необходима база знаний, в которую входят сигнальные «портреты» различных типов линий и устройств, а также алгоритмы сравнения и принятия решений. Центральным элементом выступает классификатор, способный дифференцировать состояния линии и формировать гипотезы об изменениях.

Подход, основанный на классификации типов линий и устройств, позволяет существенно повысить эффективность контроля. В первую очередь, за счёт перехода от ручной диагностики к автоматическому режиму принятия решений. Во вторую - за счёт способности выявлять даже минимальные отклонения в сигнальной среде, которые традиционные методы могли бы не зафиксировать. В отличие от методов, основанных на локальном контроле и периодическом измерении, классификационный подход предполагает непрерывный мониторинг и анализ сигналов в динамике.

Постановка задачи. Цель данной работы - разработать расширенную классификацию линий связи и подключаемых к ним устройств, способную служить основой для построения интеллектуального механизма детектирования несанкционированных вмешательств. В статье рассматриваются принципы формирования классификатора, структура сигнальных признаков, методы их извлечения и интерпретации [2].

Особое внимание уделяется универсальности предлагаемого решения - его применимости к различным типам инфраструктур и минимальной зависимости от конкретной топологии сети. Представленный в работе подход может быть интегрирован в системы технической защиты информации, использован в качестве основы для разработки аппаратных средств контроля или программных комплексов удалённого мониторинга [3]. Подход способствует не только усилению физической безопасности линий связи, но и повышению общей устойчивости информационной системы к внешним воздействиям. Задача обеспечения контроля целостности и защищённости проводных линий связи актуальна в контексте современных угроз информационной безопасности.

Несмотря на использование сертифицированных программных средств защиты, физический уровень передачи данных остаётся потенциальной зоной уязвимости. Это обусловлено тем, что несанкционированные подключения могут быть выполнены с соблюдением электрических параметров линии, не нарушая явно её работоспособность,

но обеспечивая возможность перехвата информации или внедрения неавторизованных устройств. Существующие методы технического контроля, включая импульсную рефлектометрию и методы спектрального анализа, не всегда позволяют точно идентифицировать факт подключения нового устройства, особенно в случае его согласования с параметрами линии. Большинство решений ориентированы на ручной или полуручной режим диагностики, что ограничивает их применение в задачах непрерывного мониторинга.

Таким образом, требуется разработка подхода, обеспечивающего:

- автоматическую идентификацию изменений в сигнальных характеристиках линии;
- формирование эталонного сигнального «портрета» линии и устройств;
- классификацию подключаемых устройств по степени соответствия допустимым и потенциально опасным типам;
- минимизацию ложных срабатываний при высокой чувствительности системы к физическим изменениям в канале.

Для реализации данного подхода необходимо:

- провести структурированную классификацию типов линий связи и характеристик устройств;
- определить сигнальные признаки, чувствительные к вмешательству;
- разработать архитектуру классификатора, пригодную для встраивания в систему удалённого контроля;
- оценить применимость предложенного решения для различных сценариев эксплуатации.

Решение поставленной задачи позволит создать интеллектуальный механизм обнаружения несанкционированных подключений, не зависящий от конкретной архитектуры защищаемой системы и пригодный для применения в условиях ограниченного доступа к линии.

Методы исследования. Предлагаемый метод идентификации подключаемых устройств к линиям связи основан на предпосылке, что каждое устройство, включаемое в физическую цепь, неизбежно оказывает влияние на сигнальные характеристики линии, даже при выполнении всех норм согласования [4]. Эти изменения проявляются в параметрах, таких как импеданс нагрузки, форма и спектр отражённого сигнала, амплитудно-частотная характеристика, фазовые искажения и уровень собственных шумов [5].

В отличие от логических методов обнаружения, которые опираются на анализ сетевого трафика или активность портов, предложенный подход позволяет зафиксировать факт физического подключения, независимо от поведения устройства на уровне протоколов. Воздействие устройств на линию может быть зафиксировано с помощью стандартных методов электрических измерений: импульсной диагностики, частотного сканирования и анализа коэффициента отражения [6, 23]. Полученные данные затем интерпретируются и сравниваются с эталонными характеристиками, соответствующими состоянию линии без постороннего вмешательства. Это делает возможным не только фиксацию отклонений, но и их классификацию по степени опасности и типу подключённого объекта [7, 8]. Совместная обработка фазовой и амплитудной информации позволяет задать норму для сигнального состояния линии и организовать её постоянный контроль, выявляя подозрительные изменения и определяя тип возможного подключения.

В рамках работы разработан комплексный подход, сочетающий структурную классификацию линий связи и типов устройств с анализом отражённого сигнала. Такой синтез обеспечивает высокую чувствительность к минимальным изменениям, а также позволяет интерпретировать полученные сигнальные данные в терминах функционального назначения или допустимости того или иного подключения (рис. 1). Методологически обоснованное включение параметров структуры линии позволяет повысить достоверность классификации и минимизировать количество ложных срабатываний.

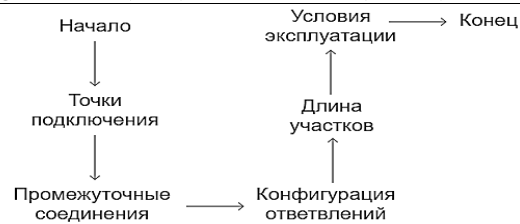


Рис. 1 – Учёт структуры подключения линии при построении сигнатуры

Fig. 1 – Accounting for Line Connection Structure in Signature Formation

Предложенный метод ориентирован на практическую реализацию в условиях реальной эксплуатации: он не требует внедрения в логическую структуру систем и может быть использован для непрерывного фонов-пассивного мониторинга состояния линии. Основой метода является анализ коэффициента отражения, который определяется как (1):

$$\Gamma = \frac{Z_H - Z_0}{Z_H + Z_0 \mu} \quad (1)$$

Появление даже согласованной нагрузки способно изменить фазовые и амплитудные параметры сигнала, особенно при высокочастотной диагностике [7]. Таким образом, коэффициент отражения становится первичным маркером изменения состояния линии.

По времени задержки отражения Δt можно определить расстояние до места неоднородности (2).

$$L = \frac{v \times \Delta t}{2} \quad (2)$$

где L - расстояние до неоднородности, v - фазовая скорость распространения сигнала в линии (для витой пары примерно 0.6 от скорости света), Δt - временной интервал между посылкой и приёмом импульса.

На основании этой задержки вычислялось расстояние до точки потенциального подключения или нарушения. При $\Delta t = 20$ нс расстояние до точки вмешательства составило 2 метра. Для оценки влияния различных подключений на параметры линии проводился замер амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Этот параметр отражает зависимость уровня передаваемого сигнала от частоты и является одним из ключевых индикаторов состояния линии [9]. В процессе эксперимента для оценки характеристик линии связи использовался метод активного зондирования, при котором на вход подавался тестовый сигнал в виде линейно-частотно модулированной последовательности в диапазоне от 1 до 50 МГц. Регистрировался отклик линии, на основе которого формировалась передаточная функция (3):

$$H(f) = \frac{U_{\text{вых}}(f)}{U_{\text{вх}}(f)}, \quad (3)$$

где $U_{\text{вых}}(f)$ и $U_{\text{вх}}(f)$ - спектральные составляющие сигналов на входе и выходе линии соответственно.

АЧХ, являющаяся модулем передаточной функции, позволяла оценивать затухание сигнала в зависимости от частоты. При этом уровень затухания на участке линии длиной L вычислялся по формуле (4):

$$\alpha(f) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{\text{вых}}(f)}{P_{\text{вх}}(f)} \right) \quad (4)$$

Для стандартной витой пары категории 5е в штатной конфигурации, без внешних подключений или структурных неоднородностей, измеренное затухание в диапазоне частот до 100 МГц составляло от 16 до 22 дБ на участке длиной 100 метров, в зависимости от наличия экранирования. Подключение устройств с реактивной нагрузкой вызывало дополнительные частотные и фазовые искажения, проявлявшиеся в виде резонансных

пиков и провалов на АЧХ, а также в виде нелинейных искажений фазово-частотной характеристики (ФЧХ). Изменения формы АЧХ и ФЧХ, особенно в диапазоне от 10 до 50 МГц, указывают на появление новых подключений и нарушения в топологии линии связи. Это связано с тем, что именно в этом частотном диапазоне наиболее ярко проявляются резонансные эффекты, вызванные изменениями нагрузки, неоднородностями или паразитными ответвлениями [21, 24]. Анализ зафиксированных амплитудных и фазовых характеристик позволяет выявлять не только сам факт вмешательства, но и делать выводы о его характере. При этом даже небольшие по уровню отклонения от эталонной характеристики могут свидетельствовать о подключении внешних устройств или изменении состояния линии. Сравнительный анализ АЧХ линии при штатной и нарушенной конфигурации позволил количественно оценить влияние подключений на затухание сигнала, а также определить частотные зоны, наиболее чувствительные к изменениям (табл. 1).

Таблица 1. Результаты анализа амплитудного отклика линии связи
Table 1. Results of Amplitude Response Analysis of the Communication Line

Частота (МГц) Frequency (MHz)	Амплитуда без подключения (дБ) Amplitude without connection (dB)	Амплитуда с подключением (дБ) Amplitude with connection (dB)
10	-1.2	-1.5
30	-2.5	-3.3
60	-4.8	-6.2

Наиболее чувствительным диапазоном к подключению нештатных устройств оказался интервал от 30 до 60 МГц, где наблюдались амплитудные отклонения более чем на 1 дБ. Для типовых линий связи, таких как витая пара категории 5е, затухание сигнала без нагрузки составляло в среднем 16-22 дБ на 100 м, тогда как вмешательства вызывали дополнительное ослабление на 0.6-1.4 дБ, а также фазовые сдвиги до 12° на частотах свыше 50 МГц. Эти изменения были выявлены с использованием расчёта передаточной функции $H(f)$ и коэффициента затухания $\alpha(f)$, описанных выше.

Полученные результаты подтверждают, что изменения формы АЧХ и ФЧХ линии в высокочастотном диапазоне являются надёжным индикатором появления новых подключений, даже в случае их согласованного импеданса. Это открывает возможность для применения фазово-амплитудного анализа в задачах удалённого контроля и классификации устройств [10, 22]. Одним из ключевых параметров, отражающих состояние линии связи, является ФЧХ, описывающая зависимость фазы выходного сигнала от частоты входного. При штатном (эталонном) подключении ФЧХ имеет близкую к линейной форму, что соответствует равномерному распространению сигнала по всем частотам спектра. В этом случае фазовый сдвиг $\varphi(f)$ описывается выражением (5):

$$\varphi(f) = \arg H(f) \quad (5)$$

При подключении внешнего устройства, особенно нештатного или паразитного, возникает нарушение линейности фазового отклика. Это связано с дополнительными отражениями, паразитной ёмкостью или индуктивностью на границе подключения [11]. В результате в спектре появляются частотные области с аномальным фазовым отклонением.

Для оценки таких искажений введён параметр максимального фазового отклонения (6):

$$\Delta\varphi = \max |\varphi_{\text{измер}}(f) - \varphi_{\text{эталон}}(f)| \quad (6)$$

В рамках эксперимента зафиксировано, что при подключении устройств с несовпадающим импедансом ($Z_H \neq Z_0$), фазовый сдвиг на частотах 50-70 МГц возрастает в среднем на 12-18°. Установленный порог для допустимых фазовых искажений составляет 10°, что позволяет уверенно классифицировать подключение как нештатное [12, 16].

На рис. 2 представлена схема формирования сигнатуры линии, в которую включён фазовый отклик как один из ключевых компонентов. Совокупный анализ фазовых и амплитудных характеристик позволяет значительно повысить достоверность удалённой идентификации аппаратных средств.

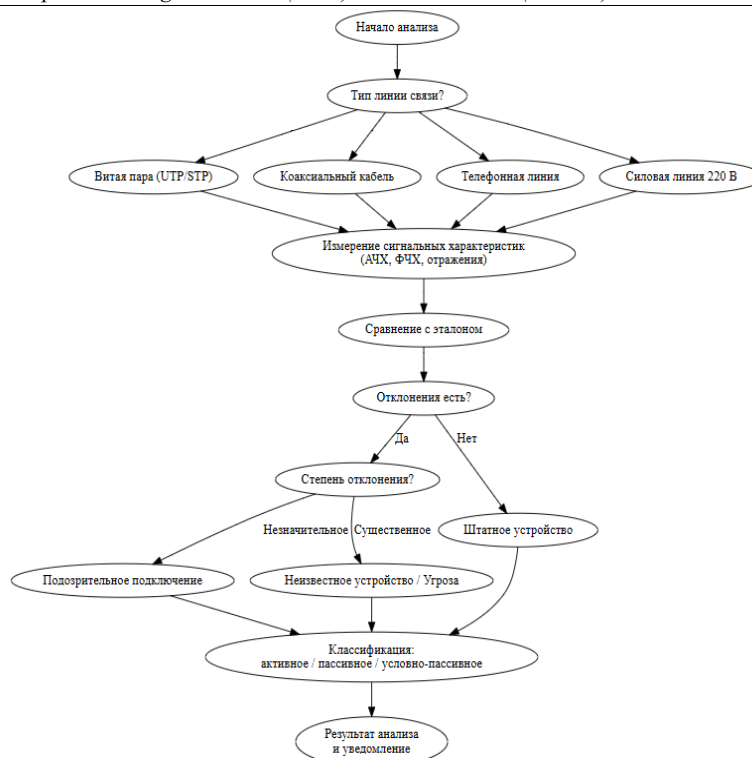


Рис. 2 – Структура классификации устройств по сигнатуре линии связи
Fig. 2 – Structure of device classification based on communication line signature

Полученные данные используются для формирования базы эталонных сигнальных «портретов» как для линий, так и для устройств. Эталон включает: амплитудно-частотную характеристику; коэффициент затухания на заданном участке; форму отражённого импульса; фазовые сдвиги. В процессе эксплуатации в линию вводится диагностический сигнал, измеряется текущий вектор характеристик и проводится сравнение с эталоном. Метод предполагает автоматическое вычисление отклонения в параметрах сигнала и принятие решения на основе допустимых пределов [13]. При этом классификация позволяет не только зафиксировать наличие вмешательства, но и провести идентификацию типа подключённого устройства. На основании сформированной сигнатуры осуществляется классификация подключения (рис. 2) и принятие соответствующего решения [17]. Отличительной чертой метода является возможность удалённой идентификации без необходимости физического доступа к линии или активного обмена данными с устройством. Это позволяет применять метод в фоновом режиме, снижая риск обнаружения со стороны нарушителя [14].

В отличие от существующих решений, ограниченных детекцией наличия нагрузки, предложенный подход обеспечивает детализированную идентификацию, с привязкой к типу линии и профилю устройства. Теоретическая значимость метода заключается в расширении представлений о взаимодействии физических линий связи с различными типами нагрузки и выявлении сигнальных признаков, пригодных для удалённой диагностики [18, 19]. Практическая значимость проявляется в возможности разработки модулей технического контроля и встроенных средств мониторинга защищаемых объектов, ориентированных на физический уровень передачи [20].

Обсуждение результатов. В ходе реализации предложенного подхода была сформирована классификационная модель, объединяющая сигнальные характеристики линий связи и аппаратных средств, подключаемых к ним. Основным результатом стало построение набора эталонных сигнатур, отражающих нормальное состояние линии в отсутствие нарушений, а также определение диапазонов допустимых отклонений, возникающих при различных типах подключений. Экспериментальное моделирование проводилось с целью выявления предельной чувствительности разработанного метода к различным

типам подключений, включая случаи подключения согласованных нагрузок, не нарушающих формально норму по импедансу. Устройства подключались к различным типам линий связи (витая пара, коаксиал, телефонная линия) с заранее известными параметрами. В линию вводился высокочастотный диагностический импульс с длительностью менее 10 нс, что соответствовало эффективной ширине спектра до 100 МГц [15]. Такое воздействие позволяет выделить даже минимальные неоднородности в тракте передачи за счёт высокой чувствительности к фазовым и частотным отклонениям. При включении даже номинально согласованной нагрузки (например, 100 Ом в линию с $Z_0 = 100$ Ом), наблюдались устойчивые изменения в форме отражённого сигнала. Они проявлялись как:

- небольшой фазовый сдвиг относительно эталона на частотах выше 40 МГц (до 7-12°);
- усиление затухания в полосе 50-70 МГц на 0.6-1.4 дБ;
- сдвиг по времени возврата отражённого импульса на 1.2-2.5 нс, обусловленный дополнительной нагрузочной ёмкостью.

Это подтверждает, что электрически «прозрачные» подключения всё же оказывают измеримое влияние на сигнальную картину линии, особенно при высокочастотном тестировании [15]. Подобный подход оказался особенно эффективным в условиях, когда физический доступ к линии отсутствует, а подключение выполняется скрытно. Именно это свойство делает метод перспективным для задач технической защиты информации, где требуется пассивный и фоновый контроль физического уровня соединений.

Проведённое сравнение с существующими методами, такими как импульсная рефлектометрия без последующей классификации, показало преимущество разработанного подхода по двум ключевым метрикам: точности идентификации и возможности дифференцировать штатные и нештатные подключения. Благодаря учёту структуры самой линии (рис. 1) и разнообразия откликов удалось минимизировать ложные срабатывания и увеличить чувствительность системы к скрытому вмешательству.

Особое внимание было уделено процедуре классификации устройств, представленному в виде логической схемы (рис. 2). Механизм позволяет формировать дерево решений, в котором сигнатурные признаки служат основанием для перехода по ветвям, заканчивающимся выводами о допустимости или недопустимости подключения. Такая реализация не только повышает автоматизм процесса, но и открывает возможность для дальнейшей интеграции элементов машинного обучения в классификатор.

Вывод. В рамках проведённого исследования решена задача выявления и идентификации подключений к проводным линиям связи на основе анализа их сигнальных характеристик. Предложенный подход ориентирован на физический уровень модели взаимодействия и обеспечивает возможность обнаружения несанкционированных или атипичных подключений без необходимости активного обмена данными с устройствами и без вмешательства в штатную топологию системы. Метод опирается на принцип отражения сигнала при нарушении согласования импеданса в линии и включает последовательную процедуру измерения, интерпретации и сравнения отражённого сигнала с эталонными характеристиками. Были использованы такие параметры, как коэффициент отражения, искажения амплитудных и фазово-частотных характеристик, а также время возврата импульса. Эти параметры формируют сигнатуру линии, позволяющую выполнять классификацию подключений по типу воздействия и потенциальной допустимости.

Разработанная классификационная модель была дополнена механизмом принятия решений, основанным на расчёте интегрального критерия отклонения. Это позволило провести сопоставление текущего состояния линии с базой эталонных профилей и выделить подключения, отличающиеся от штатных режимов эксплуатации. Результаты экспериментального моделирования подтвердили высокую чувствительность метода, в том числе к согласованным подключениям, ранее считавшимся малозаметными.

Теоретическая значимость предложенного подхода заключается в расширении представлений о взаимодействии сигнальных характеристик линии связи с различными типами

нагрузок. Практическая значимость выражается в возможности разработки автономных подсистем мониторинга, не требующих вмешательства оператора и способных функционировать в фоновом режиме. Методика может быть реализована в виде программно-аппаратного комплекса, встраиваемого в существующую инфраструктуру с минимальными затратами. Это создаёт предпосылки для использования предложенного решения в системах мониторинга инженерных сетей и в составе интеллектуальных платформ киберфизической безопасности. Сформулированные положения, теоретические и прикладные результаты подтверждены экспериментально и открывают перспективу для дальнейших разработок в области пассивного контроля и интеллектуального анализа физического уровня защищённых линий связи.

Библиографический список:

1. Алейников А.А., Билятдинов К.З., Красов А.В., Левин М.В. Контроль, измерение и интеллектуальное управление трафиком. – СПб.: Астерион, 2016. – 92с. ISBN 978-5-00045-385-8. EDN WLROTL.
2. Орлов Ю.Ф. Активная идентификация объектов управления.–М.:МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2010.296 с.
3. Куклин А.А., Кукушкин А. В. Радиотехнические измерения: учеб. пособие. – М.: Радио и связь, 2006. – 284 с.
4. Поздняков С. А., Новиков Ю. А. Анализ электрических цепей. – М.: Высшая школа, 2008. – 368 с.
5. Гусев В. Е., Трифонов Ю. И. Импульсная рефлектометрия. – М.: Энергия, 1987. – 214 с.
6. Билятдинов К. З., Красов А. В., Меняйло В. В. Исследование систем и анализ результатов испытаний. – СПб.: Астерион, 2019. – 362 с. – ISBN 978-5-00045-813-6. – EDN OXKBZW.
7. Orfanidis S. J. Electromagnetic Waves and Antennas [El. resource]. – Rutgers University, 2016. – 954 p. – Режим доступа: <https://ecseweb1.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/> (дата обращения: 14.04.2025).
8. Kurose J.F., Ross K.W. Computer Networking: A Top-Down Approach. 8th ed. Boston:Pearson, 2020;896.
9. Капралова И.А., Игнатьев М. С. Методы анализа сигналов в рефлектометрических системах // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Радиоэлектроника. – 2019. – № 3. – С. 46–54.
10. Каменев М.И., Беляков Е.И. Сигналы и процессы в радиотехнических системах. – СПб.:Лань, 2004. – 432 с.
11. Чернов И.И., Корж В.Я. Электромагнитная совместимость: учебник. – М.: Горячая линия – Телеком, 2011. – 360 с.
12. Мухина И.А. Анализ методов защиты локальных вычислительных сетей от несанкционированного доступа // Информационные технологии и безопасность. – 2018. – № 1 (15). – С. 25–31.
13. Jones S.B., Wraith J.M., Or D. Time domain reflectometry measurement principles and applications // Soil Science Society of America Journal. – 2002. – Vol. 66, no. 5. – P. 1479–1486.
14. Хромов С.П. Основы анализа и синтеза электрических цепей. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 408 с.
15. Красильников В.И. Электромагнитные переходные процессы. – М.: Академия, 2012. – 304 с.
16. Петренко П.Б., Кривокубов П.А., Зайцев Д.И., Токарева А.С. Повышение точности рефлектометрии и достоверности идентификации устройств в проводных линиях связи//Труды СПИИРАН. – 2011. – № 6. – С. 126–148.
17. Словеснов Н.А., Мирсатов С.Ф., Светличный В.В. Исследование методов идентификации оборудования в системах защиты информации проводных сетей связи // Информационная безопасность телекоммуникационных систем. – 2014. – № 4. – С. 53–60.
18. Идентификация параметров источников побочных электромагнитных излучений по измерениям в ближней зоне [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://mai.ru/upload/iblock/db3/db3e2997c3d7df16a90199a3df149a48.pdf> (дата обращения: 14.04.2025).
19. Основы идентификационных измерений // Журнал радиоэлектроники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://jre.cplire.ru/iso/nov06/2/text.html> (дата обращения: 14.04.2025).
20. Методы и средства защиты телефонных аппаратов и линий связи/БНТИ [Электронный ресурс]. Режим доступа:<https://www.bnti.ru/showart.asp?aid=68&lvl=04.03.02.&p=1>(дата обращения: 14.04.2025).
21. Основные принципы измерений и анализа сигналов/КТ-SPE Group[Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://kt-spegroup.ru/articles/osnovnye-printsipy-izmereniy-i-analiza-signalov/> (дата обращения: 16.04.2025).
22. Защита линий связи – обнаружение жучков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.shpionam.net/zachita/zashhita-linij-svjazi> (дата обращения: 16.04.2025).
23. Идентификация параметров источников побочных электромагнитных излучений: дис.. канд. техн. наук [Электрон. ресурс].Режим доступа:<https://www.dissercat.com/content/identifikatsiya-parametrov-istochnikov-pobochnykh-elektromagnitnykh-izluchenii-po-izmereniyu> (дата обращения: 16.04.2025).
24. Защита информации. Поисковая техника [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bezar.ru/zaschita-informacii-poiskovaya-tehnika> (дата обращения: 18.04.2025).

References:

1. Aleinikov A.A., Bilyatdinov K.Z., Krasov A.V., Levin M.V. Control, Measurement and Intelligent Traffic Management. St. Petersburg: Asterion, 2016; 92 p. ISBN 978-5-00045-385-8. – EDN WLROTL. (In Russ)
2. Orlov Yu.F. Active Identification of Control Objects. – Moscow: Bauman MSTU, 2010; 296 p. (In Russ)
3. Kuklin A.A., Kukushkin A.V. Radiotechnical Measurements: Textbook. Moscow: Radio i Svyaz, 2006; 284 (In Russ)
4. Pozdnyakov S.A., Novikov Yu.A. Analysis of Electrical Circuits. Moscow: Vysshaya Shkola, 2008; 368 p. (In Russ)
5. Gusev V.E., Trifonov Yu.I. Pulse Reflectometry. Moscow: Energiya, 1987; 214 p. (In Russ)
6. Bilyatdinov K.Z., Krasov A.V., Menyaylo V.V. Research of Systems and Analysis of Test Results. – St. Petersburg: Asterion, 2019; 362 p. – ISBN 978-5-00045-813-6. – EDN OXKBZW. (In Russ)
7. Orfanidis S.J. Electromagnetic Waves and Antennas [El. resource]. – Rutgers University, 2016; 954 p. – Available at: <https://ecweb1.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/> (accessed: 14.04.2025).
8. Kurose J.F., Ross K.W. Computer Networking: A Top-Down Approach. 8th ed. Boston: Pearson, 2020; 896.
9. Kapralova I.A., Ignatiev M.S. Methods for Signal Analysis in Reflectometric Systems. *Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series: Radioelectronics*. 2019; 3: 46–54. (In Russ)
10. Kamenev M.I., Belyakov E.I. Signals and Processes in Radiotechnical Systems. St. Petersburg: Lan', 2004; 432 p. (In Russ)
11. Chernov I.I., Korzh V.Ya. Electromagnetic Compatibility: Textbook. Moscow: Goryachaya Liniya – Telekom, 2011; 360 p. (In Russ)
12. Mukhina I.A. Analysis of Methods for Protecting Local Area Networks from Unauthorized Access. *Information Technologies and Security*. 2018; 1(15): 25–31. (In Russ)
13. Jones S.B., Wraith J.M., Or D. Time Domain Reflectometry Measurement Principles and Applications. *Soil Science Society of America Journal*. 2002; 66(5): 1479–1486.
14. Khromov S.P. Fundamentals of Analysis and Synthesis of Electrical Circuits. Moscow: Energoatomizdat, 2003; 408 p. (In Russ)
15. Krasilnikov V.I. Electromagnetic Transient Processes. Moscow: Akademiya, 2012; 304 p. (In Russ)
16. Petrenko P.B., Krivozubov P.A., Zaitsev D.I., Tokareva A.S. Improving the Accuracy of Reflectometry and Device Identification in Wired Communication Lines. *Proceedings of SPIRAS*. 2011; 6: 126–148. (In Russ)
17. Slovesnov N.A., Mirsatov S.F., Svetlichny V.V. Investigation of Equipment Identification Methods in Information Security Systems of Wired Communication Networks. *Information Security of Telecommunication Systems*. 2014; 4: 53–60. (In Russ)
18. Identification of Parameters of Unintentional Electromagnetic Emission Sources in the Near Zone [El. resource]. <https://mai.ru/upload/iblock/db3/db3e2997c3d7df16a90199a3df149a48.pdf> (accessed: 14.04.2025).
19. Fundamentals of Identification Measurements. *Journal of Radioelectronics* [Electronic resource]. – Available at: <https://jre.cplire.ru/iso/nov06/2/text.html> (accessed: 14.04.2025).
20. Methods and Means for Protecting Telephones and Communication Lines / BNTI [Electronic resource]. – Available at: <https://www.bnti.ru/showart.asp?aid=68&lvl=04.03.02.&p=1> (accessed: 14.04.2025).
21. Basic Principles of Signal Measurement and Analysis / KT-SPE Group [Electronic resource]. – Available at: <https://kt-speggroup.ru/articles/osnovnye-printipy-izmereniy-i-analiza-signalov/> (accessed: 16.04.2025).
22. Communication Line Protection – Bug Detection [Electronic resource]. – Available at: <https://www.shpionam.net/zachita/zashhita-linij-svjazi> (accessed: 16.04.2025). (In Russ)
23. Identification of Parameters of Unintentional Electromagnetic Emission Sources: Cand. tech. sci. diss. [El. resource]. <https://www.dissercat.com/content/identifikatsiya-parametrov-istochnikov-pobochnykh-elektromagnitnykh-izlucheni-po-izmereniya> (accessed: 16.04.2025). (In Russ)
24. Information Security. Search Equipment [El. resource]. <https://bezar.ru/zaschita-informacii-poiskovaya-tehnika> (accessed: 18.04.2025). (In Russ)

Сведения об авторе:

Сергей Сергеевич Васичкин, аспирант, кафедра защищенных систем связи, sergey_vasichkin@bk.ru

Information about authors:

Sergey S. Vasichkin, Postgraduate Student, Department of Secure Communication Systems, sergey_vasichkin@bk.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов/The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 10.08.2025.

Одобрена после рецензирования/Reviced 30.09.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 26.01.2026.

Применение искусственной нейронной сети для повышения точности настроек регуляторов ИТП на примере зданий высшей школы

С. В. Гужов¹, А. А. Арбатский², Е. В. Крылова¹, Д. З. Дзахмишева^{1,3}

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

¹11250, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14, стр. 1, Россия,

²НИИ «Энергоэффективных технологий микроклимата»,

²390029, г. Рязань, ул. Чкалова, д. 68В, помещ. НЗ, офис 213, Россия,

³АО «Атомэнергопроект»,

³107996, г. Москва, ул. Бакунинская, д. 7, стр. 1., Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является создание системы поддержки принятия решений (СППР), позволяющей автоматически производить анализ информации от датчиков, обрабатывать статистический материал и сигнализировать оператору о необходимости программирования PLC с предоставлением результатов расчётов о прогнозируемом техническом и экономическом эффекте на основе применения искусственной нейронной сети. **Метод.** Исследование основано на методах построения интеллектуальных систем управления технологическими процессами и производствами. **Результат.** Выполнено исследование возможностей повышения эффективности АСУ ТП за счет повышения точности настроек регуляторов ИТП. Рассмотрен метод повышения точности АСУ ТП посредством применения ИНС. Предложено выполнять прогнозный расчёт из прогнозов гидрометцентра с периодом прогнозирования на 4-6 часов вперёд. Предложен набор дополнительных датчиков, необходимых для повышения точности прогноза. Дополнительные капитальные затраты окупятся за 2 отопительных периода. **Вывод.** Рассмотрены существующие подходы к цифровизации методов управления теплоэнергетическим оборудованием. Применение искусственной нейронной сети позволяет повысить точность настроек регуляторов ИТП.

Ключевые слова: автоматизированная система регулирования, приточно-вытяжная вентиляционная установка, индивидуальный тепловой пункт, увлажнитель, датчик

Для цитирования: С.В. Гужов, А.А. Арбатский, Е.В. Крылова, Д.З. Дзахмишева. Применение искусственной нейронной сети для повышения точности настроек регуляторов ИТП на примере зданий высшей школы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(1):49-55. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-49-55

Using an artificial neural network to improve the accuracy of IHP controller settings using the example of higher education buildings

S.V. Guzhov¹, A. A. Arbatsky¹, E.V. Krylova¹, D.Z. Dzakhmisheva^{1,2}

¹National Research University "Moscow Power Engineering Institute",

¹14 Krasnokazarmennaya St., Bldg. 1, Moscow 11250, Russia,

²Research Institute of Energy-Efficient Microclimate Technologies,

²68V Chkalova St., Room N3, Office 213, Ryazan 390029, Russia,

³AO Atomenergoproekt,

³7 Bakuninskaya St., Moscow 107996, Russia

Abstract. Objective. The objective of the study is to create a decision support system (DSS) that automatically analyzes sensor data, processes statistical data, and alerts the operator to the need for PLC programming, providing calculation results on the predicted technical

and economic effect using an artificial neural network. **Method.** The study is based on methods for constructing intelligent control systems for technological processes and production. **Result.** The study examined the possibilities of increasing the efficiency of the automated process control system by improving the accuracy of the IHP controller settings. A method for improving the accuracy of the automated process control system by using an artificial neural network is considered. It is proposed to perform forecast calculations based on hydrometeorological center forecasts with a forecast period of 4-6 hours ahead. A set of additional sensors necessary for improving the forecast accuracy is proposed. The additional capital expenditures will pay for themselves within 2 heating periods. **Conclusion.** Existing approaches to the digitalization of heat power equipment control methods are considered. The use of an artificial neural network allows for increasing the accuracy of the IHP controller settings.

Keywords: automated control system, supply and exhaust ventilation unit, individual heating substation, humidifier, sensor

For citation: S.V. Guzhov, A.A. Arbatsky, E.V. Krylova, D.Z. Dzakhmishева. Using an artificial neural network to improve the accuracy of IHP controller settings using the example of higher education buildings. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):49-55. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-49-55.

Введение. В условиях стремительного развития современных технологий и роста требований к качеству управления инженерными системами, автоматизация становится неотъемлемой частью обеспечения эффективной работы объектов инфраструктуры.

Одним из ключевых направлений автоматизации является создание автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), которые позволяют оптимизировать работу инженерных систем и повысить их надежность. Проблема является актуальной, например, для зданий крупных высших образовательных учреждений, где энергопотребление и эксплуатационные расходы играют важную роль в обеспечении учебного процесса и комфорта студентов и преподавателей.

Автоматизированная система управления технологическими процессами представляет собой комплекс программно-технических средств, необходимых для управления различными технологическими процессами.

В контексте теплоснабжения АСУ ТП включает сбор данных о состоянии оборудования, контроль параметров процесса, а также выполнение управляющих воздействий для поддержания оптимального режима работы системы.

В компоненты АСУ ТП входят датчики и измерительные приборы, исполнительные механизмы, контроллеры и программируемые логические контроллеры (PLC), сбор и анализ данных в центральной системе управления информацией позволяет оператору получать необходимую информацию о состоянии системы и принимать обоснованные решения по управлению.

Автоматизация центральных тепловых пунктов схожа с автоматизацией других климатических систем, таких как отопление или вентиляция. Контроллеры управляют всей системой и настраиваются на выполнение алгоритмов, запрограммированных во время пусконаладочных работ.

Контроллеры могут иметь жесткое предустановленное программное обеспечение (ПО) для стандартных решений или быть свободно программируемыми для реализации уникальных проектов. Большинство контроллеров предлагают разнообразные опции регулировки параметров, включая ПИД-управление, а ПО содержит встроенные функции для адаптации и оптимизации алгоритмов под различное оборудование. Схема автоматизации тепловых пунктов должна позволять выявлять потенциальные проблемы и неисправности, а также предлагать эффективные способы их устранения.

Постановка задачи. Необходимо создание системы поддержки принятия решений (СППР), позволяющей автоматически производить анализ информации от датчиков, обрабатывать статистический материал и сигнализировать оператору о необходимости

программирования PLC с предоставлением результатов расчётов о прогнозируемом техническом и экономическом эффекте.

Необходимым представляется формирование надстройки СППР, который может производить анализ и расчёт технико-экономической целесообразности проведения модернизации системы электро- или теплоснабжения объекта посредством применения различных энергосберегающих мероприятий, содержащихся в продукционном наборе в базе данных СППР. ИТП реализован по независимой схеме с применением одного пластинчатого теплообменника, рассчитанного на полную нагрузку. В контуре отопления система измеряет параметры: температуру и расход теплоносителя; давление в трубопроводах; включение/выключение насосов циркуляционного контура и пр.

Одной из причин снижения эффективности АСУ и необходимости внедрения умных систем с расширенным функционалом является изменение во времени точности работы датчиков, которая может снижаться по различным причинам: некорректная калибровка; физический износ; нестабильное соединение и ошибка передачи данных; неоптимальные параметры и несоответствие настроек реальным условиям эксплуатации; баги или ошибки в программном обеспечении; изменения внешних условий; накопление грязи, пыли или коррозии на датчиках; коррозионные процессы в трубопроводах; использование устаревшего оборудования.

При добавлении контура горячего водоснабжения становится необходимым одновременно управлять двумя системами: обеспечивать требуемую температуру в батареях отопления; поддерживать горячую воду нужной температуры в водораздаточных кранах потребителей. Управление двухконтурной системой усложняется.

Логика работы включает: автоматическое переключение приоритетов (отопление или горячее водоснабжение); оптимизацию расходов теплоносителя при одновременной работе обеих систем; возможность временного ограничения подачи теплоты в радиаторы при большом разборе горячей воды; расширяется количество входов и выходов АСУ, появляются дополнительные контуры регулирования, расширяются функциональные возможности и повышаются требования к качеству обслуживания и скорости реакции на возникающие проблемы.

Включение контура вентиляции добавляет третий элемент, нуждающийся в самостоятельном контроле и управлении. Для управления приточно-вытяжной установкой (ПВУ) в составе: фильтр, вентилятор, электронагреватель; рекуператор, шумоглушитель, – требуются дополнительные датчики: CO₂, влажности, температуры и скорости воздушного потока; датчик температуры наружного воздуха; а также исполнительные механизмы для открытия и закрытия воздушных каналов. Расширение числа датчиков и точек управления приводит к повышению нагрузки на вычислительные ресурсы и программное обеспечение. Три независимых контура автоматизации (отопления, ГВС и вентиляции) должны действовать синхронно, учитывая ограниченность мощности тепловой сети. Координация действий отдельных контуров становится критически важной.

Методы исследования. Обработка больших объемов данных потребует внедрения современных методов аналитики и машинного обучения для выявления закономерностей и принятия оптимальных решений. Появится необходимость интеграции данных централизация сбора данных, разделения полномочий и ответственности операторов, улучшения визуализации процесса управления и оперативной реакции на события.

Всё это приводит к необходимости создания многослойной архитектуры с несколькими уровнями обработки и анализа информации. Применение предиктивной аналитики при анализе накопленного в ИТП архива измерений от АСУ ТП позволит повысить эффективность настроек АСУ. С учётом необходимой скорости регулирования теплового потока в контурах ИТП, наиболее распространен пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор). При наличии индивидуальных особенностей тепловых потерь здания регулирования с применением ПИД-регулятора становится недостаточно. В таких случаях целесообразно применять предиктивную аналитику с применением

искусственных нейронных сетей (ИНС), что в контексте автоматизации работы ИТП позволяет снизить число ошибок при разработке прогнозных моделей, а также повысить качество регулирования.

ИНС способны сценарно учитывать и моделировать, например, изменение температуры наружного воздуха с горизонтом прогнозирования 4-6 часов, что важно для рассматриваемых процессов управления теплоснабжением с учётом тепловой инерции здания. ИНС могут учитывать изменения условий эксплуатации, что повышает устойчивость системы к внешним возмущениям.

Анализ выборки за несколько лет позволит оценить состояние и дать рекомендации по замене тех датчиков, чьи диапазоны измерения приближаются к граничным значениям по точности. АСУ с нейросетевым оптимизатором (рис. 1) позволяет использовать возможности искусственного интеллекта для управления объектом без существенной модернизации системы [1-4].

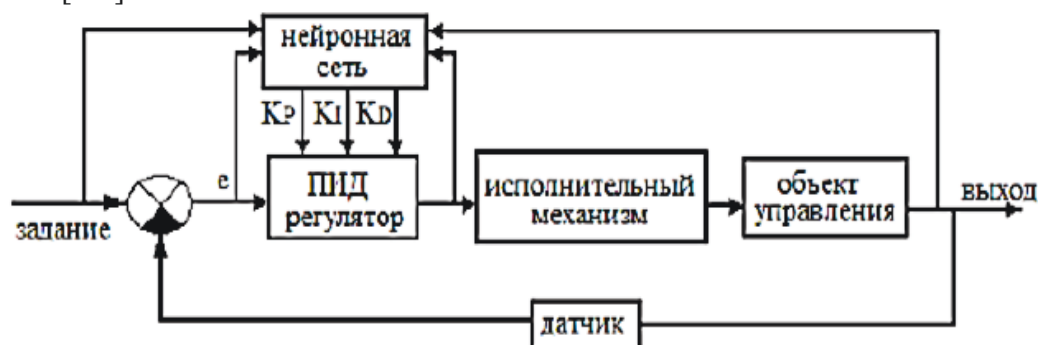


Рис. 1 – Схема управления с нейросетевым оптимизатором параметров регулятора
 Fig. 1 – Control circuit with a neural network optimizer of controller parameters

Технология не всегда дает значимые результаты, так как ИНС не обладает информацией об особенностях управляемого объекта. Эти особенности могут быть добавлены путем создания правил, которые будут определять условия, при которых обучение ИНС будет наиболее эффективно.

Обсуждение результатов. В данной работе предлагается объединить подходы использования ИНС для корректировки коэффициентов с учетом конкретных сценариев, требующих адаптации системы. Расчёт значений прогнозируемых параметров используется для предупреждения аварий посредством выдачи сигнала о прогнозном превышении уставки параметров оператору.

Современные PLC среднего класса могут содержать от 100 до 300 линий ввода и вывода параметров. Данные с датчиков поступают не только на регулятор, но и формируют архив базы данных, период накопления – раз в 1 секунду. Целесообразно расширить базу данных, на основе которой будет обучаться ИНС и включить в неё дополнительные параметры (табл. 1).

Объектом теплоснабжения является учебно-лабораторный корпус здания высшей школы общей площадью 15,196 тыс. кв. м. Система теплоснабжения закрытого типа с тепловым носителем – водой. Схема АСУ рассчитана на подачу тепловой энергии на ГВС и отопление, в систему приточно-вытяжной вентиляции.

В качестве исходных данных используются фактические данные о теплоснабжении здания: обучающая выборка – данные за 2018-2019 гг., 2019-2020 гг., 2020-2021 гг., 2021-2022 гг., тестовая выборка – данные за отопительный период 2022-2023 гг.

Для обработки данных методом подбора принята нейронная сеть типа многослойный персептрон, которая показала величину средней абсолютной ошибки (MAE) 0,6% при конфигурации: три слоя, 128 нейронов в каждой, 50 эпох обучения, погрешность – функция активации – сигмоидная.

Таблица 1. Параметры для СУБД, загружаемые в ИНС
Table 1. Parameters for the DBMS loaded into the ANN

№	Параметр / Parameter	Обозначение Designation
1	Рассчитанное потребленное количество энергии, Гкал/Calculated amount of energy consumed	Q расч
2	Температура теплоносителя на входе/ Coolant inlet temperature	T ₁
3	Температура теплоносителя на выходе/ Coolant outlet temperature	T ₂
4	Температура наружного воздуха (°C) на высоте 2 метра над поверхностью земли/ Outdoor air temperature (°C) at 2 meters above ground	T _{нв}
5	Температура воздуха (°C) внутри помещения вдали от источников отопления и прямых солнечных лучей/ Indoor air temperature (°C) away from heat sources and direct sunlight	T _в
6	Атмосферное давление, приведённое к среднему уровню моря, мм. рт. столба/ Atmospheric pressure, normalized to mean sea level, mmHg	P
7	Относительная влажность наружного воздуха (%) на высоте 2 метра над поверхностью земли/ Relative humidity of outdoor air (%) at 2 meters above ground	U
8	Направление ветра (угол) на высоте 10-12 метров над земной поверхностью, осредненное за 10-минутный период. непосредственно предшествовавший сроку наблюдения/ Wind direction (angle) at 10-12 m above ground, averaged over a 10-min. period immediately preceding the observation.	DD
9	Скорость ветра на высоте 10-12 метров над земной поверхностью. осредненная за 10-минутный период, непосредственно предшествовавший сроку наблюдения (м/с)/ Wind speed at 10-12 meters above ground, averaged over a 10-minute period immediately preceding the observation (m/s).	Ff
10	Процент заоблаченности небосвода/ Cloud cover percentage	c
11	Отопление в Москве включено / выключено/ Heating on/off in Moscow	0/1
12	График пребывания людей в корпусе/ Building occupancy schedule	%
13	Местное время / Local time	Дд.мм.гггг чч:мм
14	Вибрация электрического привода и его насоса / вентилятора/ Vibration of electric drive and its pump/fan	f _в
15	Электропроводимость теплоносителя сразу после магнитного фильтра / Coolant conductivity immediately after the magnetic filter	σ
16	Наличие протечки теплоносителя/ Presence of coolant leaks	Пр
17	Количество наработанных часов оборудованием, электрическим приводом, механизмами/ Number of operating hours of equipment, electric drives, and mechanisms	t _{час}
18	Разница температур на входе первого контура и выходе второго контура теплообменного аппарата - мониторинг эффективности теплообменника (чистоты пластин теплообменника)/ Temperature difference between the primary circuit inlet and secondary circuit outlet of the heat exchanger - monitoring heat exchanger efficiency (heat exchanger plate cleanliness)	ΔT

По итогам обработки фактических данных теплотребления: Q_{исх}=1003,97 Гкал. Исходя из норматива удельного теплотребления для учебных зданий: ~0.025–0.028 Гкал/м²·°C·сут, прогнозное теплотребление составляет 867,57 Гкал. Предложено выполнять прогнозный расчёт из прогнозов гидрометцентра с периодом прогнозирования на 4-6 часов вперёд.

Расчётный перетоп за 2023-2024 отопительный период составляет 136,4 Гкал/год (рис. 2), что составляет 13,58% от теплотребления, в финансовом эквиваленте перерасход составляет 331 058 руб./год.

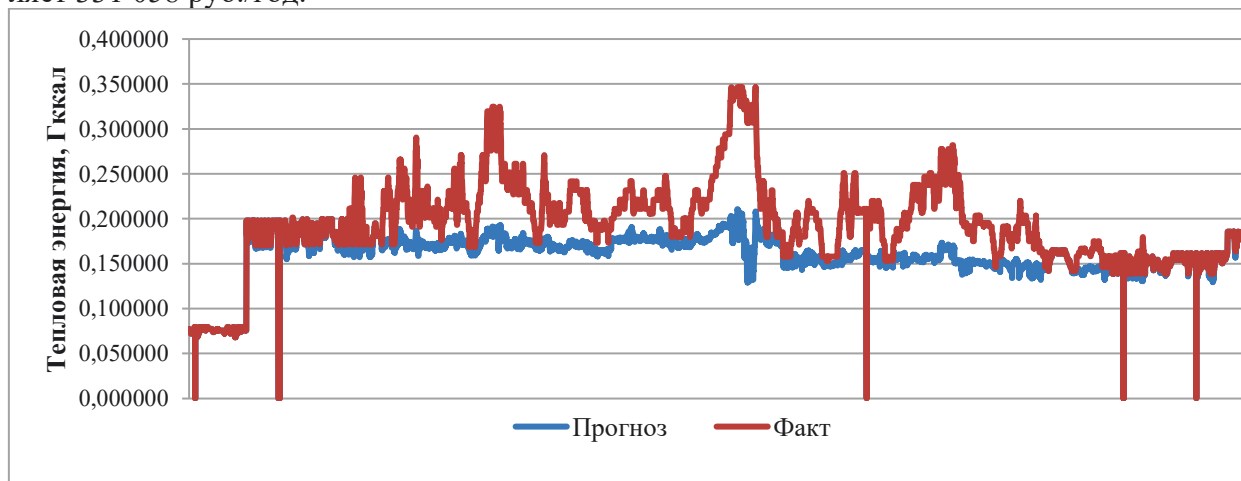


Рис. 2 – График потребление тепловой энергии: фактический и прогнозируемый
Fig. 2 – Thermal energy consumption graph: actual and predicted

Такая большая разница может свидетельствовать как о неточной настройке регулятора ИТП, так и о необходимости учета дополнительных параметров, влияющих на теплотребление объекта. Для наполнения базы и обучения ИНС предлагается установить дополнительные датчики.

Для измерения температуры наружного воздуха – термосопротивление ОВЕН ДТС125Л-50М.В2.60 [5]. Датчик вибрации VTV121 [6] с диапазоном частот от 1 Гц до 1000 Гц и чувствительностью не менее 10 мВ/(мм/с) производителя IFM Electronic устанавливается на подшипниках насосов и теплообменных аппаратов.

Для рассматриваемого объекта необходимо 7 датчиков: по одному на каждый насос. Датчик Condumax CLS12 [7] электропроводимости прямого измерения устанавливается сразу после установленного магнитного фильтра, с диапазоном 0–200 мкСм/см.

Датчик протечки GIDROLOCK WSP [8] проволоочного типа диапазоном чувствительности до 1 сантиметра в среднем – около насосов, теплообменников, коллекторов, трубопроводов и арматуры. Общая стоимость дополнительных датчиков составит 329,3 тыс. руб. в ценах 2026г. Для экономии капитальных затрат предлагается использовать открытое ПО.

Стоимость интеграции ИНС с АСУ ТП оценивается в 300 тыс. руб. Таким образом, простой срок окупаемости СППР для повышения эффективности АСУ ИТП составит 1,9 отопительных периода.

Вывод. Выполнено исследование возможностей повышения эффективности АСУ ТП за счет повышения точности настроек регуляторов ИТП.

Рассмотрен метод повышения точности АСУ ТП посредством применения ИНС. Предложено выполнять прогнозный расчёт из прогнозов гидрометцентра с периодом прогнозирования на 4-6 часов вперёд.

Предложен набор дополнительных датчиков, необходимых для повышения точности прогноза. Дополнительные капитальные затраты окупятся за 2 отопительных периода.

Библиографический список:

1. Варшавский, П.Р. Архитектура распределенной системы для интеллектуального анализа данных на основе прецедентов / П.Р. Варшавский, С.А. Поляков // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2023. – № 4. – С. 155-161. – DOI 10.24160/1993-6982-2023-4-155-161. – EDN LUTBAJ.
2. Аракелян, Э.К. Выбор и оценка приоритетных направлений повышения интеллектуальности АСУТП ТЭС / Э.К. Аракелян, А.А. Косой // Вести в электроэнергетике. – 2022. – № 5(121). – С. 52-57. – EDN KTVNSG.
3. Мезин, С.В. Сравнительный анализ работы классических многомерных систем управления и систем с нейрорегулятором на примере реального объекта / С.В. Мезин, Д.А. Дементьев // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2024. – № 2. – С. 117-125. – DOI 10.24160/1993-6982-2024-2-117-125. – EDN CNBLGF.
4. Мезин, С.В. Сравнительный анализ работы классических многомерных систем управления и систем с нейрорегулятором на примере реального объекта / С. В. Мезин, Д. А. Дементьев // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2024. – № 2. – С. 117-125. – DOI 10.24160/1993-6982-2024-2-117-125. – EDN CNBLGF.
5. ДТСхх5.И термосопротивления с выходным сигналом 4...20 мА ОВЕН [Электронный ресурс]. <https://owen-ufa.ru/shop/proizvoditeli/owen/dtshh5-termosoprotivleniya-s-vyhodnym-signalom-4-20-ma-oven/?ybaip=1&yclid=4928094631278673919> (дата обращения 14.01.2026).
6. VTV121 Датчик вибрации IFM [Электронный ресурс]. <https://ifm-russia.ru/product/vtv121/> (дата обращения 14.01.2025).
7. Датчик измерения удельной электрической проводимости Condumax CLS12 [Электронный ресурс]. <https://rizur.ru/catalog/analiz-EH/analogovyy-datchik-provodimosti-condumax-cls12/?ysclid=mh35apbhs23875283> / (дата обращения 14.01.2026).
8. Датчик контроля протечки воды Neptun SW005-10,0 [Электронный ресурс]. https://lunda.ru/catalog/category/c13207/product/datchik-wsp-gidrolock_102349.html?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F (дата обращения 14.01.2025).

References:

1. Varshavsky, P.R. Architecture of a distributed system for intellectual data analysis based on precedents / P.R. Varshavsky, S.A. Polyakov. *Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute. Bulletin of MPEI*. – 2023; 4:155-161. – DOI 10.24160/1993-6982-2023-4-155-161. – EDN LUTBAJ.
2. Arakelyan, E.K. Selection and assessment of priority areas for improving the intelligence of automated process control systems of thermal power plants / E.K. Arakelyan, A.A. Kosoy. *Vesti v elektroenergetike*. 2022;5 (121):52-57. – EDN KTVNSG.
3. Mezin, S.V. Comparative analysis of the operation of classical multivariate control systems and systems with a neurocontroller using the example of a real object / S.V. Mezin, D.A. Dementyev. *Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute. MPEI Bulletin*. 2024;2:117-125. – DOI 10.24160/1993-6982-2024-2-117-125. – EDN CNBLGF.
4. Mezin, S.V. Comparative analysis of the operation of classical multivariate control systems and systems with a neurocontroller using the example of a real object / S.V. Mezin, D.A. Dementyev. *Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute. MPEI Bulletin*. 2024; 2: 117-125. – DOI 10.24160/1993-6982-2024-2-117-125. – EDN CNBLGF.
5. DTSxx5.И thermistors with an output signal of 4...20 mA OWEN [Electronic resource]. <https://owen-ufa.ru/shop/proizvoditeli/owen/dtshh5-termosoprotivleniya-s-vyhodnym-signalom-4-20-ma-oven/?ybaip=1&yclid=4928094631278673919> (date of access 01/14/2026).
6. VTV121 IFM vibration sensor [Electronic resource]. <https://ifm-russia.ru/product/vtv121/> (date of access 01/14/2025).
7. Condumax CLS12 Specific Conductivity Sensor [Electronic resource]. <https://rizur.ru/catalog/analiz-EH/analogovyy-datchik-provodimosti-condumax-cls12/?ysclid=mh35apbhs23875283> / (accessed on January 14, 2026).
8. Neptun SW005-10.0 Water Leak Monitoring Sensor [Electronic resource]. https://lunda.ru/catalog/category/c13207/product/datchik-wsp-gidrolock_102349.html?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F (accessed on January 14, 2025).

Сведения об авторах:

Гужов Сергей Вадимович, кандидат технических наук, доцент; директор Центра подготовки и профессиональной переподготовки «Автоматизированные системы управления тепловыми процессами в энергетике и промышленности»; GuzhovSV@yandex.ru; ORCID 0000-0002-3722-7669

Арбатский Андрей Андреевич, кандидат технических наук, генеральный директор; arbatsky1985@mail.ru

Крылова Елена Владимировна, кандидат педагогических наук, доцент; заместитель директора по учебной работе Института тепловой и атомной энергетики; KrylovaYelV@mpei.ru

Дзахмисева Диана Зауровна, инженер-проектировщик; DzakhmishevaDZ@mpei.ru

Information about authors:

Sergey V. Guzhov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Director of the Center for Training and Professional Retraining "Automated Thermal Process Control Systems in Energy and Industry"; GuzhovSV@yandex.ru; ORCID 0000-0002-3722-7669

Andrey A. Arbatsky, Cand. Sci. (Eng.), General Director; arbatsky1985@mail.ru

Elena V. Krylova, Cand. Sci. (Pedag.), Assoc. Prof.; Deputy Director for Academic Affairs, Institute of Thermal and Nuclear Energy; KrylovaYelV@mpei.ru

Diana Z. Dzakhmisheva, Design Engineer; DzakhmishevaDZ@mpei.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 23.10.2025.

Одобрена после рецензирования/Reviced 29.11.2025.

Принята в печать /Accepted for publication 15.01.2026.

Энтропия А. Реньи как обобщение базовых процессов

А.С. Дулесов, Д.Б. Байыр, И.А. Бычкова

Хакассский государственный университет им. Н.Ф. Катанова,
Инженерно-технологический институт,
655017, г. Абакан, ул. Ленина 92/1, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является обоснование возможности применения энтропии А. Реньи в задаче анализа аддитивных и мультипликативных процессов роста, относящихся к сложным техническим системам. **Метод.** Предложена модель Реньи, включающая обобщение свойств присущих элементам сложной системы, и необходимая для анализа процессов роста. Модель включает математические выражения вычисления вероятностей аддитивных и мультипликативных процессов роста, а также обобщенное уравнение в универсальной форме, позволяющее связать оба типа роста. **Результат.** Подкрепленный примером анализ показывает важность полученных значений энтропии Реньи в зависимости от параметра a модели, связанного с процессами роста. Выполненные вычисления энтропии Реньи показали, что изменение параметра a позволяет расширить круг применяемых мер однородности. Если значение параметра принимается близким единице, следовательно, рассматриваются чувствительные процессы, характеризующиеся тонкими различиями в распределениях вероятностей состояний объектов. Увеличивая a уменьшается чувствительность оценки, позволяя выделить наиболее масштабные отклонения при распределении вероятностей. Вариация параметра a возможна при условии выделения различных уровней чувствительности и является неотъемлемой частью изменения структуры исследуемого множества объектов. **Вывод.** Применимость энтропии Шеннона ограничена аддитивными процессами, тогда как для исследования сложных систем и процессов применима энтропия Реньи. Это эффективный инструмент анализа процессов роста, наделенный гибкостью в применении характеристик чувствительности в оценке изменений роста. Изменяя параметр a , аналитику предоставлена возможность выполнять оценку неоднородности вероятности распределения на множестве состояний объектов с различной степенью детализации. Применение энтропии Реньи эффективно для анализа состояния не только технических, но и экономических, биологических и других систем.

Ключевые слова: обобщенные процессы роста, энтропия А. Реньи, энтропия К. Шеннона, анализ состояния систем, аддитивные и мультипликативные процессы

Для цитирования: А.С. Дулесов, Д.Б. Байыр, И.А. Бычкова. Энтропия А. Реньи как обобщение базовых процессов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(1):56-63. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-56-63.

A. Renyi's Entropy as a generalization of Basic Processes

A.S. Dulesov, D.B. Bayyr, I.A. Bychkova

Katanov State University, Institute of Physics and Technology,
92/1 Lenin St., Abakan 655017, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to substantiate the possibility of applying A. Renyi's entropy to the problem of analyzing additive and multiplicative growth processes related to complex technical systems. **Method.** The Renyi model is proposed, which includes a generalization of the properties inherent in the elements of a complex system and is necessary for the analysis of growth processes. The model includes mathematical expressions for calculating the probabilities of additive and multiplicative growth processes, as well as a generalized equation

in a universal form that links both types of growth. **Result.** The analysis shows the importance of the obtained values of Renyi entropy depending on the parameter a of the model associated with the growth processes. The performed calculations of the Regnal entropy showed that changing the parameter a makes it possible to expand the range of applied uniformity measures. If the parameter value is assumed to be close to one, therefore, sensitive processes are considered, characterized by subtle differences in the probability distributions of the states of objects. By increasing a , the sensitivity of the estimate decreases, making it possible to identify the largest deviations in the probability distribution. Variation of parameter a is possible provided that different sensitivity levels are selected and is an integral part of changing the structure of the studied set of objects. **Conclusion.** The applicability of Shannon entropy is limited to additive processes; Renyi entropy is applicable to the study of complex systems and processes. It is an effective tool for analyzing growth processes, endowed with flexibility in applying sensitivity characteristics in assessing growth changes. By changing the parameter a , it is possible to estimate the heterogeneity of the probability distribution on a set of states of objects with different levels of detail. In particular, the use of The use of Renyi entropy is effective for analyzing the state of technical, economic, and biological systems.

Keywords: generalized growth processes, A. Renyi entropy, K. Shannon entropy, system state analysis, additive and multiplicative processes

For citation: A.S. Dulesov, D.B. Bayir, I.A. Bychkova. A. Renyi's Entropy as a generalization of Basic Processes. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):56-63. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-56-63.

Введение. Одним из основополагающих факторов анализа состояния системы можно считать информацию. Она призвана отражать множество разнообразных процессов, связанных с движением энергий, свойствами материи [1], наличием массы тел [2]. Несмотря на сложность такого рода анализа, не остаются без внимания вопросы измерения информации, среди которых используются вероятности и энтропия. Применение энтропии в анализе состояния системы оговаривается рядом условий: соответствует ли система термодинамическим процессам и законам термодинамики, а также свойствами, согласно которых их относят к изолированным, закрытым и открытым системам [3].

Рассматриваемые системы обмениваются с окружающей средой энергией и веществом, наделены большим объемом разнообразной информации и статистических данных, что свидетельствует о их сложности и открытости. Состояние данных систем описывается совокупностью параметров и функций. Чтобы измерить информацию, обладающую неопределенностью, востребована величина плотности распределения вероятностей $p(x)$ случайных значений измеряемой величины x с дальнейшим вычислением энтропии $H(x)$. Существует ряд известных методов и моделей вычисления информационной энтропии, ознакомится с которыми можно, например, в работах [4, 5].

Постановка задачи. Сложность процессов, протекающих в открытых системах, вынуждает отойти от конкретики и перейти к понятию «обобщение» энтропии. Обобщенная энтропия вычисляется через логарифм количества разнообразных состояний системы при условии сохранения ее структуры для независимых элементов. Тем самым в расчетах мы освобождаемся от каких-либо условных вероятностных представлений, а систему можно рассматривать с любым количеством элементов. Результат обобщения при рассмотрении случайного процесса, приводит нас к выполнению опытов не только в численном выражении, но и к возможности привязать энтропию к некоторой функции времени.

Обратимся к анализу процессов (явлений), наделенных такими типами роста как аддитивный и мультипликативный. Они наделены классическими математическими операциями: сложение и умножение. В частности, если рассматривать систему, то можно предположить, что мультипликативный рост (операция умножения) не приводит к изменению ее структуры, тогда как аддитивный рост (операция сложения) сопровождается структурными изменениями. Стохастический аддитивный рост рассматриваемого множества

становится явным тогда, когда вероятности прироста каждого элемента множества будут равны между собой. Стохастический мультипликативный рост прослеживается согласно правила: элемент i тем вероятнее прирастает, чем выше его величина x_i в общей массе всего множества X . К этим фундаментальным типам роста относят: аддитивное уменьшение или деградация; мультипликативную деградацию, которой соответствует операция - деление.

Таким образом, в анализе состояния системы востребованы эффективные инструменты вычисления энтропии. Они, путем обобщения энтропии Шеннона, могли бы за счет наличия семейства функционалов оценивать неопределённости или случайности системы с рассмотрением аддитивных и мультипликативных процессов.

Методы исследования. Анализируя данные о состоянии системы к одной из моделей можно отнести правило: в каждый момент времени рассматриваемое множество элементов не возрастает на одну единицу, а только теряет ее. При этом применяемы уравнения вычисления вероятности не меняют своей формы. Тогда можно дистанцироваться от уравнений вероятности прироста, а довольствоваться вероятностью события на элементе i .

Сравнивая между собой уравнения прирост на одну единицу или наоборот, потерю одной единицы, уравнение вероятности события на элементе i в аддитивном процессе имеет вид:

$$p_i = 1 / k, \quad (1)$$

где k - множество элементов или событий.

В мультипликативном процессе вероятность определяется по выражению:

$$p_i = x_i / \sum_{i=1}^k x_i. \quad (2)$$

Представим (2) в универсальном виде, позволяющее связать оба типа роста:

$$p_i = x_i^a / \sum_{i=1}^k x_i^a. \quad (3)$$

Параметр a для всех x_i в (3) одинаков, что соответствует обобщенному уравнению. Параметр может принимать любые значения, даже отрицательные. Данное выражение примет аддитивный вид для вычисления вероятности при $a=0$, тогда как для $a=1$ – мультипликативный. В случае $a>1$ рассматриваются процессы, в которых разница в относительной доле x_i увеличивается, то есть когда множество X растет. С другой стороны, при $a<0$ имеем процессы, в которых элементы множества X становятся малоразличимы не только относительных, но и в абсолютных соотношениях.

Рассматривая данный спектр параметра a , более понятным и удобным для целей анализа процессов можно считать, что этот параметр должен лежать в диапазоне от 0 до 1. Тем не менее множество систем отвечают условиям, при которых параметр лежит за пределами диапазона. Это характерно для сложных систем, среди которых следует признать технические, с требованиями необходимого анализа структурной и функциональной надежности.

Из вышеизложенного становится очевидным: применение теории информации востребовано для связи базовых процессов с энтропией растущего множества k элементов. Что касается аддитивного роста, он увеличивает энтропию в зависимости от k равновероятных состояний. Мультипликативный рост не изменяет энтропии множества X , что означает неизменность структуры системы.

Энтропия может рассматриваться как мера беспорядка в системе (например, ознакомившись с работой [6]). Рост энтропии в системе, в зависимости от задачи анализа, не всегда будет выглядеть как рост беспорядка, но и как рост упорядоченности. В качестве примера рассмотрим техническую систему, состояние которой (согласно надежности) под воздействием случайных факторов соответствует росту энтропии. Её величина будет означать ухудшение состояния системы, характерное как возрастание хаоса. Во избежание снижения уровня надежности системы, согласно графика работ выполняются ремонты

и замена оборудования (включая ликвидацию аварий). Тем самым устраняется неопределенность информации в системе и как фактор – ее возвращение к порядку.

Рассматривая разные процессы роста (аддитивные, мультипликативные или обобщенные), мы связываем их с массой, размерами, то есть с изменением величин x_i , полагая, что они случайны. В данном случае, если принять меру однородности в качестве традиционной, то становится естественным обратиться к использованию энтропии. Классической формулой расчёта энтропии является формула, предложенная Шенноном [7]:

$$H = - \sum_{i=1}^k p_i \ln p_i. \quad (4)$$

Выражение (4) имеет связь с усредненной энтропией Больцмана для подсистем и термодинамической энтропией Гиббса [8]. Справедливость данной формулы соответствует соблюдению условия нормировки $\sum_i p_i = 1$ и хорошо работает для аддитивных обобщенных систем. Возможности в применении этого выражения представлены в работе [9] и кроме этого нашло свое широкое применение, например, в анализе состояния технических систем [10].

Следует отметить тот факт, что модель Шеннона имеет свои ограничения в анализе сложных систем, например, технических. Выражение (4) – среднестатистическая величина частных энтропий и справедливо для нормального распределения плотности вероятности случайных величин. Поэтому не в полной мере согласуется с наблюдаемыми процессами мультипликативного роста. Одним из камней преткновения, согласно [11], можно считать отсутствие возможности учета степенных распределений.

Представим пример, относящийся к данной ситуации. Одним из показателей надежности технической системы является параметр потока отказов $\omega(t)$: отношение числа отказавших элементов в единицу времени к числу исправных элементов (при выходе из строя подлежащих замене новыми или отремонтированными). В случае $x(t) = x = const$ параметр потока отказов соответствует интенсивности отказов $\lambda(t)$: $\omega(t) = \lambda(t) = x(t) = x$.

Обращаясь к рассмотрению жизненного цикла технической системы, его можно условно представить в обобщенной форме как типичную зависимость интенсивности отказов от времени $\lambda(t)$ с наличием трех периодов: приработки и отказов некачественных изделий; нормальной эксплуатации, когда $\lambda(t) = const$; старения.

В первом и третьем периодах рост интенсивности имеет степенной вид и отличается от аддитивного роста, что не гарантирует точности измерения энтропии по Шеннону. Второй период является продолжительным по времени эксплуатации системы и применение классической шенноновской энтропии здесь уместно.

Принимая во внимание измерение состояния системы, с позиции анализа надежности, востребован учет двух противоположных состояний элемента: работоспособное и неработоспособное (отказ). Вероятность первого из них – p_1 , второго – $p_2 = 1 - p_1$.

Рассчитывая энтропию по формуле (4), для разных p_1 можно получить величину энтропии H . Её максимальная величина достигается в точке $p_1 = p_2 = 0,5$, когда состояния максимально вероятностно однородны. Если разница между p_1 и p_2 максимальна, энтропия $H=0$, означает стремление неоднородности в системе к бесконечности. Однако эти два крайних состояния, имеющих отношение к анализу надежности, практически не рассматриваются. Поскольку для сложных систем в практике эксплуатации не рассматриваются противоположные состояния с вероятностями $p_1 \approx p_2$, постольку при этом она не способна выполнить в достаточном объеме заданные функции (установленные регламентом). В реальности ей свойственно состояние неоднородности в пользу работоспособного состояния.

Аналогично можно оценивать неоднородность состояний двух объектов. При этом для вычисления p_1 и p_2 возьмем величины x_1 и x_2 как доли множества X . Пусть множество будет состоять из двух объектов с элементами x_1 и x_2 , а вероятности определятся как $p_1 = x_1/(x_1+x_2)$ и $p_2 = x_2/(x_1+x_2)$. Когда $x_1 = x_2$, энтропия объектов будет максимальной.

Если вести речь об однородности или неоднородности, то в качестве величины x , для примера, можно взять интенсивность отказов λ . Она может служить основанием для вычисления энтропии Шеннона с целью оценки неоднородности множества.

Предложим к рассмотрению пример. В процессе эксплуатации находится два однородных технических объекта (с одинаковым сроком эксплуатации). В течение рассматриваемого периода времени интенсивность отказов первого объекта зафиксирована в два раза выше интенсивности второго объекта. Принято решение, выполнять восстановление объекта после каждого отказа так, чтобы мера однородности согласно интенсивности восстановления, оставалась постоянной. В качестве меры однородности взята энтропия Шеннона. Для ее сохранения был соблюден принцип: чем больше весовая доля интенсивности отказов в их суммарном весе, тем большую долю интенсивности восстановления получал объект. Тем самым просматривается стремление сохранить однородность частот. Однако данный принцип не отвечает некоторым свойствам надежности: для объекта с более высокой частотой отказов (по причине старения объекта) не избежать ее роста в большей степени, чем объект с малой частотой. В данном случае прослеживается неоднородность появления событий.

Если отойти от отмеченного выше принципа, когда вероятность вычислялась согласно (2), то возможно применение обобщенного правила вычисления вероятности по формуле (3). В ней a не равнялась бы единице, а была бы (согласно примеру) равной $1/2$. Тогда становится очевидным, что шенноновская энтропия не будет постоянной, она возрастает. Чтобы избежать решения такого рода задач, можно рекомендовать к применению энтропию Реньи [12].

Обсуждение результатов. Энтропия Реньи является обобщением энтропии Шеннона и представляет собой семейство функционалов вычисления количественных значений разнообразия неопределенности или случайных состояний системы. Реньи доказал, что постулат аддитивности энтропии существенно ограничивает класс функций $f(x)$.

Реально возможны лишь два типа функций: $f(x) = d + c \cdot x$ и $f(x) = c \cdot \exp(1-q)x$ (c и d - произвольные постоянные, $q > 0$). Энтропия Реньи вычисляется по формуле:

$$H_a(X) = \frac{1}{1-a} \ln \left(\sum_i^k p_i^a \right), \quad (5)$$

где $a \geq 0$, $a \neq 1$.

Согласно требованию аддитивности, через коэффициент a можно измерять классы энтропий для статистически независимых систем при условии $\sum_i p_i = 1$. Согласно (5),

если все вероятности $p=1/k$, то для различных a имеем частную энтропию $H_a = \ln k$. Увеличивая a энтропия убывают. При возрастании a энтропия Реньи в большей степени будет определена через рассмотрение высоких вероятностей событий. Низкие значения a , стремящиеся к нулю, определяют энтропию Реньи, которая в большей степени взвешивает все возможные события более равномерно, независимо от их вероятностей. Промежуточный случай $a=1$ дает энтропию Шеннона, которая обладает особыми свойствами. При $a=0$ максимально возможная энтропия Шеннона, $\ln k$. Различные свойства энтропии Реньи рассмотрены в источниках [13-15]. Таким образом, в зависимости от значения a получаем разные меры однородности - от самых малочувствительных до сверхчувствительных.

Поясним это на примере с объектом, имеющим два противоположных состояния, характеризующиеся величинами x : x_1 уменьшается с шагом 1 начиная с 11 до 1; x_2 увеличивается с 1 до 11. Согласно условия $p_1 + p_2 = 1$, вероятности получаем из выражений $p_1 = x_1/(x_1 + x_2)$ и $p_2 = x_2/(x_1 + x_2)$ для всех 11 состояний.

Применяем формулу Реньи, вычисляя каждую энтропию i для всех 11 состояний:

$$H_{ia} = \frac{1}{1-a} \ln (p_{1i}^a + p_{2i}^a).$$

Вычисляя по каждому из коэффициентов a значения энтропии, получаем итоговый результат, представленный в табл. 1.

Таблица 1. Результаты вычисления энтропии для различных значений коэффициента a

Table 1. Results of entropy calculation for different values of the coefficient a

Состояния States Энтропия Entropy	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$H_{1a}, a=0.05$	0,664	0,679	0,686	0,690	0,692	0,693	0,692	0,690	0,686	0,679	0,664
$H_{2a}, a=0.3$	0,530	0,608	0,651	0,676	0,689	0,693	0,689	0,676	0,651	0,608	0,530
$H_{3a}, a=3$	0,130	0,269	0,413	0,549	0,653	0,693	0,653	0,549	0,413	0,269	0,130
$H_{4a}, a=50$	0,089	0,186	0,294	0,414	0,550	0,693	0,550	0,414	0,294	0,186	0,089

Для наглядности полученных результатов, данные в табл. 1 представим на рис. 1.

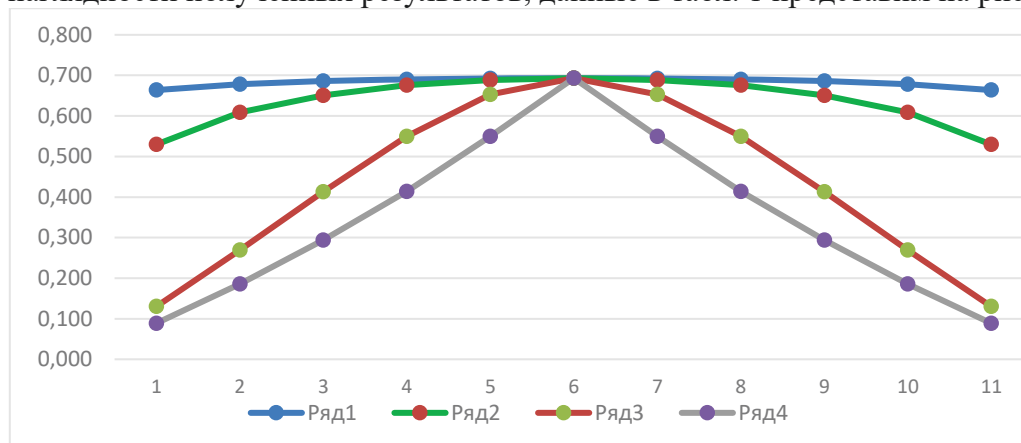


Рис. 1 – Диаграмма распределения энтропии Реньи для четырех коэффициентов a

Fig. 1 – Diagram of the distribution of the Renyi entropy for four coefficients a

С ростом параметра a , формула становится более чувствительнее к разнице между вероятностями p_1 и p_2 . При малых значениях a , энтропия Реньи не претерпевает заметных изменений для широкого диапазона различий двух состояний. Принимая $a=1$ получаем энтропию по Шеннону. Рассмотрим случай, когда $a=0$. Тогда формула Реньи (5) будет выглядеть как $H_{a=0} = \ln k$. В такой формуле не учитывается разница вероятностями между состояниями x и величина энтропии зависит только от количества состояний k . Следовательно, не зависимо от того, сколько объектов эксплуатируется в систем (при условии постоянства их количества) и как бы мы не вкладывались ресурсами в поддержании надежности, получали бы одну и ту же энтропию системы. Фактическим нами рассматривается формула энтропии (количества информации) по Хартли [16], пригодная для равновероятных состояний (как частный случай энтропии Реньи). Представленные здесь научно обоснованные выкладки могут занять свое положение, например, в вопросах анализа социальных [17] и надежности технических систем [18-20].

Вывод. В качестве меры информации в анализе состояния системы можно считать обобщенную энтропию, вычисляемую через логарифм количества ее разнообразных состояний. Обращаясь к вопросу анализа процессов (явлений) роста, среди которых - аддитивный и мультипликативный, можно довольствоваться вероятностью события на элементе системы. Отличительной особенностью в определении вероятностей является параметр a . Его изменение определяет величину исходной вероятности в мультипликативном росте параметров системы при неизменности ее структуры.

Положительным фактором процесса роста (аддитивного, мультипликативного) является связь вероятностей с такими случайными величинами как масса, размеры, объем. Тем самым принятие в анализе меры однородности становится фактором перехода к вычислению и применению энтропии. Применение в данном анализе формулы Шеннона

ограничено, например, при анализе структурной надежности сложных технических систем некоторые параметры не отвечают свойствам аддитивных процессов.

Предложение о применимости энтропии Реньи для анализа процесса роста можно считать наиболее перспективным, поскольку важным аспектом здесь является параметр α . Его значимость в определении энтропии Реньи для процессов аддитивного и мультипликативного роста обосновывается примером рассмотрения объекта, имеющим два противоположных состояния, характеризующиеся величинами измеряемого множества.

Изменяемая величина параметра α в формуле Реньи позволяет получать разные меры однородности - от самых малочувствительных до сверхчувствительных процессов роста. Автоматизируя процесс изменения параметра, например, средствами машинного обучения, можно отслеживать спектр от $\alpha=0$ до бесконечности.

Библиографический список:

1. Robson B., Ochoa-Vargas G. Searching for the Principles of Less Artificial AI. Informatics in Medicine Unlocked, 2022, p. 101018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235291482200005X> (дата обращения: 23.11.2022)
2. Vopson M.M. Mass-Energy-Information Equivalence Principle. AIP Advances, vol. 9, no. 9, September 2019, pp. 095206. doi: 10.1063/1.5123794. URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.5123794> (дата обращения: 22.11.2022)
3. StudFiles. Свойства больших систем. Электронный ресурс. Доступ: <https://studfile.net/preview/7400234/page:3/>. (дата обращения: 25.03.2025)
4. Бекман И.Н. Идеи порядка и беспорядка в физической химии. Материалы семинара «Физическая химия: Quo vadis?» URL: https://profbeckman.narod.ru/poryadok/Doclاد_poryadok.pdf (дата обращения: 05.04.2025)
5. Королев О.Л., Кусый М.Ю., Сигал А.В. Применение энтропии при моделировании процессов принятия решений в экономике: монография / под ред. А.В. Сигала. Москва: ИНФРА-М, 2022. 202 с. ISBN 978-5-16-018651-8. DOI: 10.12737/1865188.
6. Dionisdimetor. Правда и мифы об энтропии. Как работает второй закон термодинамики? Habr, 20 января 2024, 13:00. URL: <https://habr.com/ru/articles/787724> (дата обращения: 10.04.2025)
7. Shannon C.E. Mathematical Theory of Communication. *Bell System Tech. Journal*, Vol. 27, No. 3, 1948, pp. 379–423.
8. Гиббс Дж.В. Термодинамика. Статистическая механика. Москва: Наука, 1982. 584с.
9. Хинчин А.Я. Понятие энтропии в теории вероятностей. УМН, №3(55), 1953, стр. 3–20.
10. Dulesov A.S., Karandeev D.Y., Konovalov A.A., Bayyr D.B., Dulesova N.V. Probability and Information Entropy in the Analysis of Reliability of Technical Systems. SMARTGREENS 2024 International Conference Proceedings. URL: <https://doi.org/10.63550/iceip.2025.1.1.026> (дата обращения: 12.04.2025)
11. P. Bak. How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality. Springer-Verlag, New York, 1996.
12. Alfrped Rényi. On Measures of Entropy and Information. Proc. Fourth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, University of California Press, 1961, Vol. I, pp. 547–561. URL: <https://projecteuclid.org/euclid.bsmmsp/1200512181> (дата обращения: 17.06.2023)
13. Alfred Rényi. Probability Theory. North Holland Publishing Company, Amsterdam-London, 1970.
14. Beck C., Schlögl F. Thermodynamics of Chaotic Systems. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1993.
15. Климентович Ю.Л. Статистическая теория открытых систем. ТОО Янус, Москва, 1995.
16. Хартли Р.В.Л. Transmission of Information. *Bell System Technical Journal*, Vol. 7, 1928, pp. 535–63.
17. Грачев М.И. Модель автоматизации процессов управления вузом. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(4):60-70. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-4-60-70>
18. Кодацкий Н.М., Ревякина Е.А., Газизов А.Р. Системный анализ и обработка информации для задачи выявления поломки информационного накопителя компьютера. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(4):87-98. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-4-87-98>
19. Дровникова И.Г., Етепнев А.С., Рогозин Е.А. Основные виды уязвимостей и взаимосвязь компонентов безопасности при обосновании показателей надёжности системы защиты информации от несанкционированного доступа в автоматизированных системах // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2019. – № 3. – С. 59–64. – EDN VWGONY
20. Ефимов А.О. Причины возникновения, классификация и критичность уязвимостей программного обеспечения информационных систем. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(2):98-106. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2025-52-2-98-106>

References:

1. Robson B., Ochoa-Vargas G. Searching for the Principles of Less Artificial AI. Informatics in Medicine Unlocked, 2022, p. 101018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235291482200005X> (date of request: 11/23/2022)
2. Vopson M.M. Mass-Energy-Information Equivalence Principle. AIP Advances, 2019;9(9) September pp. 095206.doi:10.1063/1.5123794.<http://dx.doi.org/10.1063/1.5123794> (date of request: 11/22/2022)
3. StudFiles. Properties of large systems. An electronic resource. Access: <https://studfile.net/preview/7400234/page:3/>. (date of request: 03/25/2025)
4. Bekman I.N. Ideas of order and disorder in physical chemistry. Materials of the seminar "Physical Chemistry: Quo vadis?"https://profbeckman.narod.ru/poryadok/Doclاد_poryadok.pdf(date of request: 04/05/2025)
5. Korolev O.L., Kussyi M.Yu., Sigal A.V. The use of entropy in modeling decision-making processes in economics: a monograph / edited by A.V. Sigal. Moscow: INFRA-M, 2022;202 p. ISBN 978-5-16-018651-8. DOI: 10.12737/1865188.
6. Dionisdimetor. The truth and myths about entropy. How does the second law of thermodynamics work? Habr, January 20, 2024, 13:00. URL: <https://habr.com/ru/articles/787724> (accessed: 04/10/2025)
7. Shannon C.E. Mathematical Theory of Communication. *Bell System Tech. Journal*.1948;27(3):379-423.
8. Gibbs J.V. Thermodynamics. Statistical mechanics. Moscow: Nauka Publ., 1982. 584p.
9. Khinchin A.Ya. The concept of entropy in probability theory. UMN, No. 3(55), 1953, pp. 3-20.
10. Dulesov A.S., Karandeev D.Y., Konovalov A.A., Bayyr D.B., Dulesova N.V. Probability and Information Entropy in the Analysis of Reliability of Technical Systems. SMARTGREENS 2024 International Conference Proceedings. URL: <https://doi.org/10.63550/iceip.2025.1.1.026> (date of access: 04/12/2025)
11. P. Bak. How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality. Springer-Verlag, New York, 1996.
12. Alfréd Rényi. On Measures of Entropy and Information. Proc. Fourth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, University of California Press, 1961, Vol. I, pp. 547–561. URL: <https://projecteuclid.org/euclid.bsmsp/1200512181> (accessed: 06/17/2023)
13. Alfred Rényi. Probability Theory. North Holland Publishing Company, Amsterdam-London, 1970.
14. Beck C., Schlögl F. Thermodynamics of Chaotic Systems. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1993.
15. Klimentovich Yu.L. Statistical theory of open systems. Janus LLP, Moscow, 1995.
16. Hartley R.V.L. Transmission of Information. Bell System Technical Journal, 1928; 7: 535-63.
17. Grachev M.I. The model of automation of university management processes. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2024;51(4):60-70. (In Russ.) <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-4-60-70>
18. Kodatsky N.M., Revyakina E.A., Gazizov A.R. System analysis and information processing to solve the problem of detecting breakdowns of computer information storage. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2024;51(4):87-98.(In Russ) doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-4-87-98
19. Drovnikova I.G., Etepnov A.S., Rogozin E.A. Main Types of Vulnerabilities and the Relationship of Security Components in Justifying Indicators of Information Protection System Reliability Against Unauthorized Access in Automated Systems. Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics. 2019; 3: 59–64. – EDN VWGOHY. (In Russ)
20. Efimov A.O. Causes, classification, and criticality of information system software vulnerabilities. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2025;52(2):98-106. (In Russ.) <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2025-52-2-98-106>

Сведения об авторах:

Дулесов Александр Сергеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры цифровых технологий и дизайна; dulesov@khsu.ru; ORCID 0000-0001-6371-0171

Байыр Долаан Борисович, аспирант кафедры цифровых технологий и дизайна; dolaan.bayyr@mail.ru
Бычкова Ирина Александровна, магистрант кафедры цифровых технологий и дизайна; irina.bychkova.02@mail.ru; ORCID 0000-0003-1732-5947

Information about authors:

Alexander S. Dulesov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof., Department of Digital Technologies and Design; dulesov@khsu.ru; ORCID 0000-0001-6371-0171

Dolaan B. Bayyr, Postgraduate Student, Department of Digital Technologies and Design; dolaan.bayyr@mail.ru;

Irina A. Bychkova, Master's Student, Department of Digital Technologies and Design; iri-na.bychkova.02@mail.ru; ORCID 0000-0003-1732-5947

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 27.05.2025.

Одобрена после рецензирования/Revised 04.11.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 15.01.2026.

Оптимизационные задачи, связанные с количественной оценкой уровня защищенности, на основе анализа уязвимостей автоматизированных систем

А.О. Ефимов, Е.А. Рогозин

Воронежский институт МВД России,
394065, г. Воронеж, пр. Патриотов, 53, Россия

Резюме. Цель. В статье решается проблема количественной оценки уровня защищённости автоматизированных систем органов внутренних дел в условиях постоянного роста числа выявляемых уязвимостей и ограниченности ресурсов, затрачиваемых на их устранение. Проведён анализ существующих подходов к оценке защищённости информационных систем, показаны их ограничения, связанные с отсутствием формализованного учёта ресурсных ограничений и взаимосвязей между уязвимостями. **Метод.** В качестве метода решения поставленной задачи предложен математический аппарат, основанный на совокупности оптимизационных моделей. Рассмотрены три задачи: минимизация вероятности эксплуатации уязвимостей системы путём подбора оптимальных элементов АС ОВД; выбор наиболее уязвимых элементов для приоритетной проверки; выбор комплекта средств устранения уязвимостей с учётом их стоимости и допустимой ошибки. Для формализации применены методы динамического программирования и оптимизации. **Результат.** Результаты вычислительного эксперимента на модельных данных демонстрируют эффективность предложенного подхода, позволяющего переходить от «жадных» алгоритмов устранения уязвимостей к оптимальным стратегиям обеспечения защищённости. Совместное решение оптимизационных задач обеспечивает более рациональное распределение ресурсов и снижение вероятности уязвимостей при ограничениях по времени и стоимости. **Вывод.** Разработанные метод и модели могут быть положены в основу практических механизмов управления защищённостью АС ОВД. Применение предложенного подхода открывает перспективу интеграции количественных методов в процессы оценки и повышения уровня защищённости автоматизированных систем правоохранительных органов.

Ключевые слова: автоматизированные системы, информационная безопасность, уязвимости, количественная оценка защищённости, оптимизационные задачи, динамическое программирование, комбинаторная оптимизация

Для цитирования: А.О. Ефимов, Е.А. Рогозин. Оптимизационные задачи, связанные с количественной оценкой уровня защищенности, на основе анализа уязвимостей автоматизированных систем. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(1):64-72. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-64-72.

Optimization tasks related to quantifying the security level based on vulnerability analysis of automated systems

A.O. Efimov, E.A. Rogozin

Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia,
53 Patriotov St., Voronezh 394065, Russia

Abstract. Objective. The article discusses the problem of quantifying the level of security of automated systems of internal affairs bodies (AS) in the context of a constant increase in the number of identified vulnerabilities and limited resources spent on their elimination. An analysis of approaches to assessing the security of information systems is conducted, and their limitations associated with the lack of a formalized accounting of resource constraints and relationships between vulnerabilities are shown. **Method.** A mathematical apparatus based on a set of optimization

models is proposed. Three tasks are considered: minimizing the likelihood of exploiting system vulnerabilities by selecting the optimal elements of the AS control system; selecting the most vulnerable elements for priority verification; selecting a set of vulnerability mitigation tools, taking into account their cost and error tolerance. Dynamic programming and optimization methods were applied. **Result.** The results of the computational experiment on model data demonstrate the effectiveness of the proposed approach, which makes it possible to move from "greedy" algorithms for eliminating vulnerabilities to optimal security strategies. Joint solution of optimization problems ensures rational allocation of resources and reduction of the probability of vulnerabilities under time and cost constraints. **Conclusion.** The developed method and models can be used as a basis for practical mechanisms for managing the security of ATS automated systems. The application of the proposed approach opens up the prospect of integrating quantitative methods into the assessment processes and increasing the level of security of automated law enforcement systems.

Keywords: automated systems, information security, vulnerabilities, quantitative assessment of security, optimization tasks, dynamic programming, combinatorial optimization

For citation: A.O. Efimov, E.A. Rogozin. Optimization tasks related to quantifying the security level based on vulnerability analysis of automated systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):64-72. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-64-72.

Введение. Современные автоматизированные системы органов внутренних дел (АС ОВД) функционируют в условиях постоянного воздействия на их программное обеспечение и инфраструктуру со стороны потенциальных нарушителей.

Непрерывный рост количества выявляемых уязвимостей программного обеспечения, а также расширение спектра угроз информационной безопасности существенно осложняют задачу обеспечения защищённости таких систем. Специфика функционирования АС ОВД предполагает необходимость гарантированной устойчивости к деструктивным воздействиям, поскольку сбои в их работе напрямую затрагивают выполнение государственных функций в сфере правопорядка и безопасности. Вопросы выявления, анализа и устранения уязвимостей в автоматизированных системах традиционно исследуются в рамках оценки соответствия требованиям информационной безопасности, анализа рисков и управления жизненным циклом программного обеспечения. Однако существующие подходы в большинстве случаев опираются на экспертные методы или ориентированы на «жадные» стратегии устранения уязвимостей без учёта ограничений ресурсов и взаимосвязей между отдельными уязвимостями. Это снижает эффективность принимаемых решений и затрудняет формирование оптимальных мер защиты в условиях ограниченного времени, количества специалистов и доступных средств устранения уязвимостей.

Постановка задачи. Актуальность разработки методов количественной оценки уровня защищённости АС ОВД обусловлена рядом факторов.

Во-первых, постоянный рост числа выявляемых уязвимостей программного обеспечения требует перехода от качественных экспертных подходов к строгим количественным методам, позволяющим формализовать процесс оценки защищённости. Во-вторых, практическая деятельность органов внутренних дел характеризуется ограниченностью ресурсов – временных, кадровых и финансовых, что обуславливает необходимость применения методов оптимизации для выбора наиболее эффективных решений. В-третьих, существующие модели оценки защищённости информационных систем зачастую не учитывают совокупность ограничений, возникающих при реализации процессов устранения уязвимостей, и тем самым не позволяют выстроить комплексный механизм управления защищённостью. В этих условиях разработка математического аппарата, позволяющего формализовать задачи выбора, приоритизации и устранения уязвимостей, становится научно и практически значимой. Решение данной задачи обеспечивает возможность перехода от фрагментарных и локальных методов обеспечения защищённости к оптимизированным стратегиям,

учитывающим специфику функционирования автоматизированных систем органов внутренних дел.

Методы исследования. Современные подходы к обеспечению информационной безопасности автоматизированных систем органов внутренних дел опираются на необходимость комплексной оценки защищённости с учётом уязвимостей. В нормативной базе закреплены ключевые положения, касающиеся понятийного аппарата, показателей защищённости и общих принципов обеспечения безопасности [1, 9, 10, 19-24].

В частности, в документах ФСТЭК России определяются методики оценивания уровня критичности уязвимостей, что позволяет формировать количественные показатели для практического применения в системах защиты [19]. Значительное внимание уделяется разработке методов формализации уязвимостей и их классификации по критериям влияния на надёжность и устойчивость систем [3, 16]. Исследования показывают, что уязвимости представляют собой ключевой фактор, определяющий эффективность защиты информации, и требуют построения моделей взаимосвязей компонентов безопасности [3]. С этим согласуются работы, посвящённые формированию методологических основ интеллектуальной защиты, основанных на системно-кибернетическом подходе [17].

Широкое распространение получили количественные методы анализа уязвимостей, основанные на международных метриках, таких как CVSS [2, 6], а также на методиках OWASP [7]. В отечественных исследованиях рассматриваются вопросы выявления уязвимостей средствами анализа параметрических данных вычислительных сетей [5], а также методики оценивания надёжности систем защиты от несанкционированного доступа [24].

В последние годы активно развиваются методы статического и динамического анализа программного обеспечения для выявления уязвимостей [12]. Появились инструменты, использующие машинное обучение и глубокие нейронные сети для автоматизации анализа исходного кода [13, 15]. Применение технологий fuzzing и методов, учитывающих целостность контрольных сумм, позволяет повысить точность обнаружения критических дефектов [14]. Современные исследования подчеркивают значимость интеграции методов искусственного интеллекта в систему оценки уязвимостей [11, 15].

Вопросы практической реализации оценки защищённости тесно связаны с построением показателей и моделей управления рисками. В ряде работ предложены концептуальные основы оценки уровня защищённости на основе характеристик уязвимостей [11, 18], что соответствует современным тенденциям перехода от экспертных оценок к формализованным количественным методикам. При этом важную роль играют карты источников, содержащих сведения об уязвимостях [8], позволяющие строить прогностические модели и учитывать динамику угроз.

Таким образом, анализ существующих исследований демонстрирует переход от формальных методик к формализованным количественным подходам, в основе которых лежит оптимизация процессов выявления и устранения уязвимостей, а также использование интеллектуальных методов анализа и прогнозирования.

Обсуждение результатов. Представим метод и модели количественной оценки уровня защищённости АС ОВД на основе уязвимостей [8, 25-27] в виде схемы (рис. 1).

Схема наглядно демонстрирует ограничения возникающие в процессе выявления и устранения уязвимостей программного обеспечения АС. Среди них необходимо однозначно выделить следующие: ограничение по времени устранения уязвимостей, ограничение по количеству специалистов ИБ и средств устранения уязвимостей, ограничение по выбору средств устранения уязвимостей. Весьма логично, что в связи с постоянным ростом числа выявляемых уязвимостей, ограничения по ресурсам, затрачиваемым на реализацию процесса устранения уязвимостей и защиты от угроз информационной безопасности, становятся более значимыми.

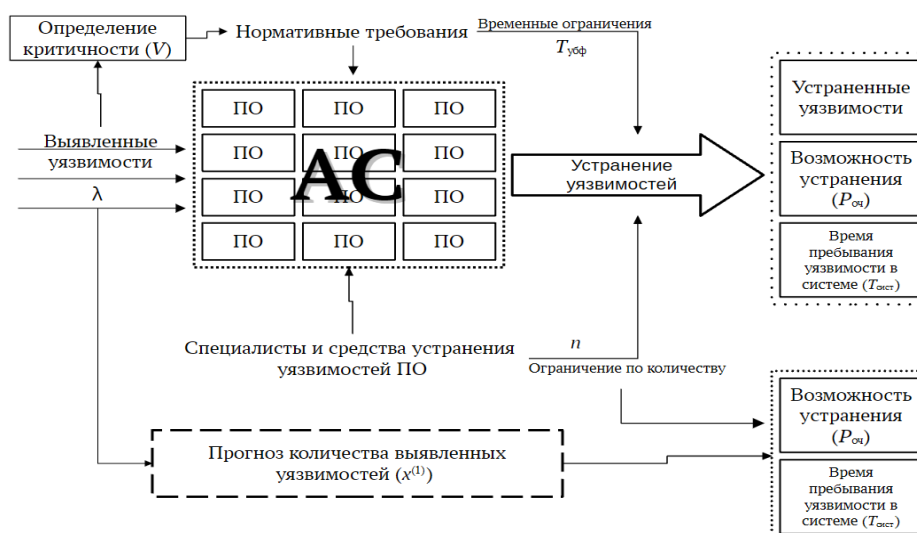


Рис. 1 – Схема реализации метода и моделей количественной оценки уровня защищённости АС ОВД

Fig. 1 – Scheme of implementation of the method and models for quantifying the level of security of the AS

Представим эти ограничения на рис. 2:

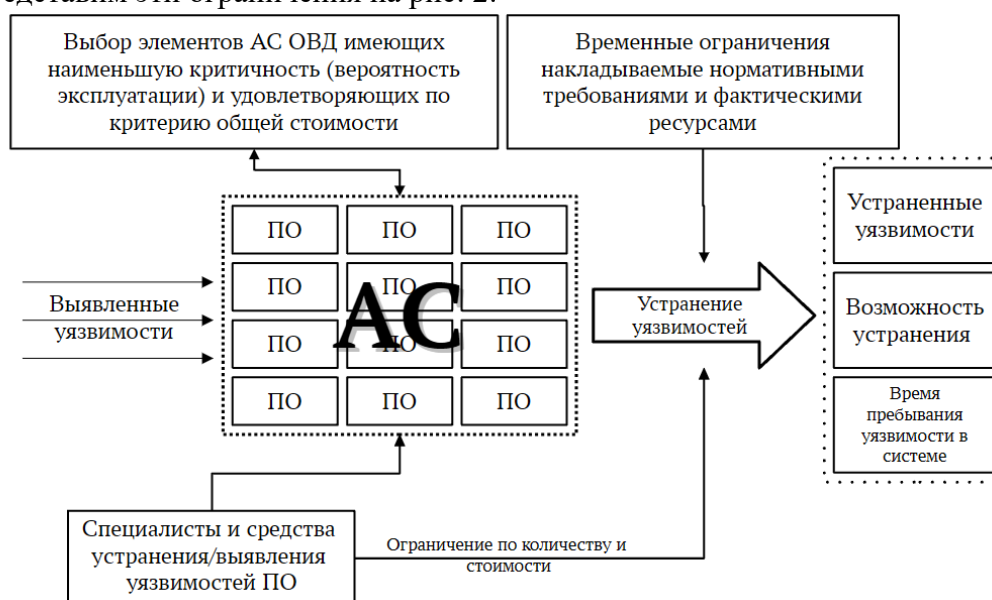


Рис. 2 – Схема, содержащая ограничения, возникающие при реализации метода и моделей количественной оценки уровня защищённости АС ОВД

Fig. 2– A scheme containing limitations that arise when implementing a method and models for quantifying the level of security of an AS

Следовательно, процесс устранения уязвимостей непосредственно связан с решением ряда оптимизационных задач, в связи с этим рассмотренная выше схема будет содержать блок решения оптимизационных задач, и будет представлена следующим образом (рис.3). Сформулируем набор оптимизационных задач, требующих решения:

1. Задача минимизации вероятности эксплуатации уязвимости системы путем подбора оптимальных элементов АС ОВД;
2. Задача выбора наиболее уязвимых элементов АС ОВД;
3. Задача выбора комплекта средств устранения уязвимостей АС ОВД.

Перейдем к формализации и решению представленных задач.

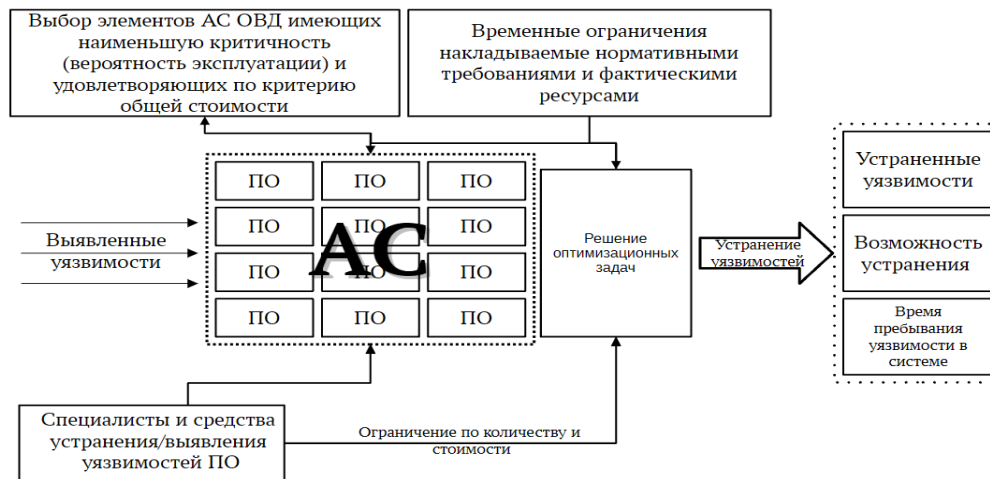


Рис. 3 – Схема, содержащая ограничения и решение оптимизационных задач, возникающие при реализации метода и моделей количественной оценки уровня защищённости АС ОВД
Fig. 3 – A scheme containing limitations and solutions to optimization problems that arise when implementing a method and models for quantifying the level of security of an AS

Задача 1. Задача минимизации вероятности эксплуатации уязвимости системы путем подбора оптимальных элементов АС ОВД.

Пусть система P состоит из N элементов, которые характеризуются вероятностями эксплуатации уязвимости $q_1, q_2, \dots, q_n$ и их значениями $d_1, d_2, \dots, d_N$. Требуется минимизировать вероятность эксплуатации уязвимостей (поражения системы) Q , а также предусмотреть ограничение по стоимости её элементов, чтобы данное значение не превышало заданной величины D , то есть необходимо определить количество элементов каждого типа x_j :

$$Q = \min (1 - \prod_{j=1}^N (1 - q_j^{x_j})). \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^N d_j x_j \leq D, x_j = 1, 2, 3 \dots \quad (2)$$

Введем в рассмотрение $f_n(D_n)$:

$$f_n(D_n) = \min_{x_j} (1 - \prod_{j=1}^N (1 - q_j^{x_j})). \quad (3)$$

$$D_n = \sum_{j=1}^N d_j x_j \leq D. \quad (4)$$

Функциональное уравнение Беллмана примет следующий вид:

$$f_n(D_n) = \min(f_{n-1}(D_n - d_n x_n) + q_n^{x_n} f_{n-1}(D_n - d_n x_n) q_n^{x_n}), D_n < D. \quad (5)$$

Задача 2. Задача выбора наиболее уязвимых элементов АС ОВД

В рассматриваемой АС ОВД необходимо определить наиболее уязвимые элементы (с уязвимостями максимальной критичности). Определим q_j – вероятность поражения j -го элемента к моменту проверки; $T_{\text{доп}}$ – допустимое время проверки; t_j – время проверки j -го элемента.

$$Q = (1 - \prod_{j=1}^N (1 - q_j(t_j))). \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^N t_i \leq T_{\text{доп}}. \quad (7)$$

$$f_n(T_n) = \max_{t_j} (1 - \prod_{j=1}^N (1 - q_j(t_j))). \quad (8)$$

$$T_n = \sum_{j=1}^N t_j. \quad (9)$$

Функциональное уравнение Беллмана примет следующий вид:

$$f_n(T_n) = \max_{T_n \leq T_{\text{доп}}} (f_{n-1}(T_n - t_n) + q_n(t_n)f_{n-1}(T_n - t_n)q_n(t_n)). \quad (10)$$

Задача 3. Задача выбора комплекта средств устранения уязвимостей АС ОВД

Необходимо найти набор средств m с минимальной стоимостью C и суммарной ошибкой не превосходящей заданной величины Q . Дополнительно определим: C_i – стоимость i -го средства; $|x_{ij}|$ – матрица (1 – контроль j -уязвимости i -средством; 0 – в противном случае); q_{ij} – достоверность проверки.

$$q_{ij} = \alpha_{ij} + \beta_{ij}, \quad (11)$$

где α_{ij}, β_{ij} – ошибки первого и второго рода соответственно.

$$C = \min \sum_{i=1}^m C_i y_i. \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^m z_{ij} = 1, \quad j = \overline{1, n}. \quad (13)$$

$$z_{ij} \leq x_{ij} y_i, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m q_{ij} z_{ij} \leq Q, y_i \in \{0, 1\}. \quad (15)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, \text{возможно применение } i - \text{го средства} \\ 0, \text{в противном случае} \end{cases}. \quad (16)$$

$$y_i = \begin{cases} 1, \text{средство включено} \\ 0, \text{в противном случае} \end{cases}. \quad (17)$$

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, \text{уязвимость } j \text{ устранена средством } i \\ 0, \text{в противном случае} \end{cases}. \quad (18)$$

Таким образом, представленный набор оптимизационных задач формирует математический аппарат для управления защищенностью АС ОВД в условиях ограниченных ресурсов. Совместное решение этих задач позволяет перейти от «жадного» алгоритма устранения уязвимостей к оптимальным вариантам обеспечения защищенности АС ОВД.

Вывод. Проведенное исследование позволяет констатировать, что проблема количественной оценки уровня защищенности автоматизированных систем органов внутренних дел в условиях нарастающей динамики выявляемых уязвимостей и объективной ограниченности ресурсов требует перехода от качественных, экспертно-ориентированных методик к строго формализованному математическому аппарату. Существующие подходы, несмотря на свою распространенность, демонстрируют системную недостаточность, обусловленную отсутствием комплексного учета ресурсных ограничений и взаимного влияния уязвимостей, что приводит к принятию субоптимальных решений при планировании и реализации мер защиты.

В качестве методологического базиса преодоления указанных ограничений в работе предложен и формализован комплекс взаимосвязанных оптимизационных моделей.

Разработанный аппарат, основанный на методах динамического программирования и комбинаторной оптимизации, позволяет структурировать и решить три ключевые задачи управления защищенностью:

Представленные оптимизационные модели обладают свойствами полноты, адекватности и практической применимости. Они могут быть положены в основу создания автоматизированных систем поддержки принятия решений для руководителей подразделений информационной безопасности органов внутренних дел. Перспективой дальнейших исследований видится углубление моделей за счет учета цепочек взаимосвязанных уязвимостей, интеграции методов машинного обучения для прогнозирования появления новых уязвимостей и адаптации предложенного аппарата для задач управления защищенностью в гетерогенных и динамически изменяющейся инфраструктуре АС ОВД.

Библиографический список:

1. Аветисян А.И., Белеванцев А.А., Чуляев И.И. Технологии статического и динамического анализа уязвимостей программного обеспечения // Вопросы кибербезопасности. – 2014. – № 3(4). – С. 20–28. – EDN SSYPXV.
2. Бокова О.И., Дровникова И.Г., Етепнев А.С. [и др.] Методики оценивания надежности систем защиты информации от несанкционированного доступа в автоматизированных системах//Труды СПИИРАН. – 2019. – Т. 18, № 6. – С. 1301–1332. DOI 10.15622/sp.2019.18.6.1301-1332. – EDN YBNXOV.
3. ГОСТ Р 53114-2008. Информационная технология. Защита информации. Основные термины и определения. – Введ. 2009-01-01. – М.: Стандартинформ, 2009. – 14 с.
4. ГОСТ Р 56546-2015. Информационная безопасность. Защита информации. Показатели защищенности информационных систем. – Введ. 2016-01-01. – М.: Стандартинформ, 2016. – 12 с.
5. ГОСТ Р 58142-2018. Информационная безопасность. Методы и средства защиты информации. Общие положения. – Введ. 2018-12-01. – М.: Стандартинформ, 2018. – 24 с.
6. Дойникова Е.В., Чечулин А.А., Котенко И.В. Оценка защищенности компьютерных сетей на основе метрик CVSS // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 6(91). – С. 76–87. – DOI 10.15217/issn1684-8853.2017.6.76. – EDN ZXWUWH.
7. Дровникова И.Г., Етепнев А.С., Рогозин Е.А. Основные виды уязвимостей и взаимосвязь компонентов безопасности при обосновании показателей надёжности системы защиты информации от несанкционированного доступа в автоматизированных системах // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2019. – № 3. – С. 59–64. – EDN VWGONH.
8. Ефимов А.О., Лившиц И.И., Мещерякова Т.В., Рогозин Е.А. Концептуальные основы оценки уровня защищенности автоматизированных систем на основе их уязвимости // Безопасность информационных технологий. – 2023. – Т. 30, № 2. – С. 63–79. DOI 10.26583/bit.2023.2.04. – EDN LGPQZP.
9. Коноваленко С.А., Королев И.Д. Выявление уязвимостей информационных систем посредством комбинированного метода анализа параметрических данных, определяемых системами мониторинга вычислительных сетей//Альманах современной науки и образования. – 2016. – № 11(113). – С. 60–66. – EDN XEEDXH.
10. Кравченко, А.С. Аппаратно-программные средства и информационные процессы защиты систем предоставления пользователям доступа к программным ресурсам/А. С. Кравченко, С. В. Родин, Т. Е. Смоленцева//Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1. С.357. EDN VIDYLR.
11. Кубарев А.В. Подход к формализации уязвимостей информационных систем на основе их классификационных признаков//Вопросы кибербезопасности. – 2013. – № 2(2). – С. 29–33. EDN SZEDHN.
12. Ланкин О.В., Сумин В.И., Воронова Е.В. Системно-комплексный кибернетический подход к формированию методологических основ интеллектуальной защиты информации от несанкционированного доступа // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7, № 8. – С. 174–176. – EDN NYIJQT.
13. Лившиц И.И. Метод оценивания безопасности облачных ИТ-компонент по критериям существующих стандартов//Труды СПИИРАН. – 2020. – Т. 19, №2. – С.383–411. DOI 10.15622/sp.2020.19.2.6. EDN DPCIDQ.
14. Математическая модель локальной политики безопасности с учетом структурных особенностей автоматизированной информационной системы информационного центра/ В.И. Сумин, А.В. Душкин, С.В. Родин, М.А. Жукова//Математические методы и информационно-технические средства: материалы IX Всероссийской научно-практической конференции, Краснодар, 21–22 июня 2013г./редколлегия: И.Н. Старостенко ответственный редактор, С.А. Вызулин, Е.В. Михайленко, Ю.Н. Сопильняк. – Краснодар: Федеральное государственное казенное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Краснодарский университет Министерства внутренних дел Российской Федерации", 2013. – С. 305-307. – EDN YTBIAH.
15. Родин, С.В. Моделирование систем защиты информации в информационных системах вневедомственной охраны : специальность 05.13.18 "Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ", 05.13.19 "Методы и системы защиты информации, информационная безопасность" : автореферат

- диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Родин Сергей Владимирович. – Воронеж, 2009. – 17 с. – EDN NKXWRJ.
16. Сумин, В.И. Разработка сетевой модели целевых установок сложных организационных систем специального назначения / В.И. Сумин, А.С. Кравченко, С.В. Родин // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17, № 3. – С. 79-87. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-77-85. – EDN QIRWOK.
 17. ФСТЭК России. Методика оценки уровня критичности уязвимостей программных, программно-аппаратных средств. – Утв. 28 октября 2022 г. – URL: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/metodicheskij-dokument-ot-28-oktyabrya-2022-g-2> (дата обращения: 04.10.2024).
 18. Щеглов К.А., Щеглов А.Ю. Защита от атак на уязвимости приложений. Модели контроля доступа // Вопросы защиты информации. – 2013. – № 2(101). – С. 36–43. – EDN QAVHRX.
 19. Forum of Incident Response and Security Teams. Common Vulnerability Scoring System version 4.0: Specification Document [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.first.org/cvss/specification-document> (дата обращения: 16.01.2025).
 20. Lin G., Wen S., Han Q.-L., Zhang J., Xiang Y. Software Vulnerability Detection Using Deep Neural Networks: A Survey // Proceedings of the IEEE. – 2020. – Vol. 108, no. 10. – P. 1825–1848. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2020.2993293>.
 21. OWASP Foundation. OWASP Risk Rating Methodology [Электронный ресурс]. – URL: https://owasp.org/www-community/OWASP_Risk_Rating_Methodology (дата обращения: 16.01.2025).
 22. Russell R. et al. Automated Vulnerability Detection in Source Code Using Deep Representation Learning // 17th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA), Orlando, FL, USA. – 2018. – P. 757–762. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICMLA.2018.00120>.
 23. Serdechny A. L., Tarelkin M. A., Lomov A. A., Simonov K. V. Карты источников, содержащих сведения об уязвимостях программного обеспечения // Информация и безопасность. – 2019. – Т. 22, № 3. – С. 411–422. – EDN ZOUMGN.
 24. Wang T., Wei T., Gu G., Zou W. TaintScope: A Checksum-Aware Directed Fuzzing Tool for Automatic Software Vulnerability Detection // IEEE Symposium on Security and Privacy, Oakland, CA, USA. – 2010. – P. 497–512. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/SP.2010.37>.
 25. Ефимов, А.О. Об осуществлении управления уязвимостями автоматизированных систем // Вестник Воронежского института МВД России. – 2023. – № 3. – С. 186-196. EDN MAYURS.
 26. Ефимов, А.О. Оценка уровня защищенности (безопасности функционирования) автоматизированных систем на основе их уязвимостей, формализованная при помощи теории систем массового обслуживания / А.О. Ефимов, Е.А. Рогозин // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2023. – Т. 50, № 2. – С. 83-89. DOI 10.21822/2073-6185-2023-50-2-83-89.
 27. Ефимов, А.О. Прогнозирование количества выявляемых уязвимостей информационной безопасности на основе теории «серых систем» / А.О. Ефимов, С.А. Мишин, Е.А. Рогозин // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2023. – Т. 50, № 3. – С. 72-82. – DOI 10.21822/2073-6185-2023-50-3-72-82. – EDN JEDBYH.

References:

1. Avetisyan A.I., Belevantsev A.A., Chuklyaev I.I. Technologies of Static and Dynamic Analysis of Software Vulnerabilities. *Cybersecurity Issues*. 2014;3(4): 20–28. – EDN SSYPXV.
2. Bokova O.I., Drovnikova I.G., Etepev A.S. [et al.] Methods for Assessing the Reliability of Information Security Systems against Unauthorized Access in Automated Systems. *SPIIRAS Proceedings*. 2019;18(6): 1301–1332. – DOI 10.15622/sp.2019.18.6.1301-1332. – EDN YBHXOB.
3. GOST R 53114-2008. Information Technology. Information Security. Basic Terms and Definitions. – Effective from 2009-01-01. – Moscow: Standartinform, 2009. – 14 p.
4. GOST R 56546-2015. Information Security. Information Protection. Security Indicators of Information Systems. – Effective from 2016-01-01. – Moscow: Standartinform, 2016. – 12 p.
5. GOST R 58142-2018. Information Security. Methods and Means of Information Protection. General Provisions. – Effective from 2018-12-01. – Moscow: Standartinform, 2018. – 24 p.
6. Doinikova E.V., Chechulin A.A., Kotenko I.V. Assessment of Computer Network Security Based on CVSS Metrics. *Information and Control Systems*. 2017;6(91):76–87. DOI 10.15217/issn1684-8853.2017.6.76. – EDN ZXWUWH.
7. Drovnikova I.G., Etepev A.S., Rogozin E.A. Main Types of Vulnerabilities and the Relationship of Security Components in Justifying the Reliability Indicators of Information Protection Systems against Unauthorized Access in Automated Systems. *Devices and Systems. Control, Diagnostics*. 2019;3:59–64. EDN VWGOHY.
8. Efimov A.O., Livshits I. I., Meshcheryakova T.V., Rogozin E.A. Conceptual Framework for Assessing the Security Level of Automated Systems Based on Their Vulnerabilities // Information Technology Security. – 2023. – Vol. 30, No. 2. – P. 63–79. – DOI 10.26583/bit.2023.2.04. – EDN LGPQZP.
9. Konovalenko S.A., Korolev I.D. Detection of Vulnerabilities in Information Systems Using a Combined Method of Analyzing Parametric Data Determined by Computer Network Monitoring Systems. *Almanac of Modern Science and Education*. 2016;11(113): 60–66. – EDN XEEDXH.
10. Kravchenko A.S., Rodin S.V., Smolentseva TE. Hardware and Software Tools and Information Processes for Protecting Systems Providing Users with Access to Software Resources. *Modern Problems of Science and Education*. 2015;1-1:357. – EDN VIDYLR.

11. Kubarev A.V. An Approach to the Formalization of Information System Vulnerabilities Based on Their Classification Features. *Cybersecurity Issues*. 2013;2(2): 29–33. – EDN SZEDHH.
12. Lankin O.V., Sumin V.I., Voronova E.V. A System-Complex Cybernetic Approach to the Formation of Methodological Foundations for Intelligent Information Protection against Unauthorized Access. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2011; 7(8):174–176. – EDN NYIJQT.
13. Livshits I.I. A Method for Assessing the Security of Cloud IT Components According to Existing Standards. *SPIIRAS Proceedings*. 2020;19(2):383–411. – DOI 10.15622/sp.2020.19.2.6. – EDN DPCIDQ.
14. Sumin V.I., Dushkin A.V., Rodin S.V., Zhukova M.A. Mathematical Model of Local Security Policy Considering the Structural Features of an Automated Information System of the Information Center // Mathematical Methods and Information-Technical Tools: Proceedings of the IX All-Russian Scientific and Practical Conference, Krasnodar, June 21–22, 2013 / Editorial Board: I.N. Starostenko (ed.), S.A. Vyzulin, E.V. Mikhailenko, Yu.N. Sopilnyak. – Krasnodar: Krasnodar University of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, 2013; 305–307. – EDN YTBIAH.
15. Rodin S.V. Modeling of Information Security Systems in the Information Systems of the Non-Departmental Security Service: Specialty 05.13.18 "Mathematical Modeling, Numerical Methods and Software Complexes", 05.13.19 "Methods and Systems of Information Security, Information Security": Abstract of Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences. Rodin Sergey Vladimirovich. Voronezh, 2009;17– EDN NKXWRJ.
16. Sumin V.I., Kravchenko A.S., Rodin S.V. Development of a Network Model of Target Settings of Complex Organizational Systems for Special Purposes. *Modeling of Systems and Processes*. 2024;17(3):79–87. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-77-85. – EDN QIRWOK.
17. FSTEC of Russia. Methodology for Assessing the Criticality of Vulnerabilities of Software and Hardware-Software Tools. – Approved on October 28, 2022. <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/metodicheskij-dokument-ot-28-oktyabrya-2022-g-2> (accessed: 04.10.2024).
18. Shcheglov K.A., Shcheglov A.Yu. Protection Against Application Vulnerability Attacks. Access Control Models. *Information Security Issues*. 2013;2(101):36–43. – EDN QAVHRX.
19. Forum of Incident Response and Security Teams. Common Vulnerability Scoring System Version 4.0: Specification Document [El.resource]. – URL: <https://www.first.org/cvss/specification-document> (accessed: 16.01.2025).
20. Lin G., Wen S., Han Q.-L., Zhang J., Xiang Y. Software Vulnerability Detection Using Deep Neural Networks: A Survey. *Proceedings of the IEEE*. 2020;108(10):1825–1848. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2020.2993293>.
21. OWASP Foundation. OWASP Risk Rating Methodology [Electronic resource]. – URL: https://owasp.org/www-community/OWASP_Risk_Rating_Methodology (accessed: 16.01.2025).
22. Russell R. et al. Automated Vulnerability Detection in Source Code Using Deep Representation Learning // 17th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA), Orlando, FL, USA. – 2018;757–762. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICMLA.2018.00120>.
23. Serdechny A.L., Tarelkin M.A., Lomov A.A., Simonov K.V. Maps of Sources Containing Information on Software Vulnerabilities. *Information and Security*. 2019;22(3):411–422. – EDN ZOUMGN.
24. Wang T., Wei T., Gu G., Zou W. TaintScope: A Checksum-Aware Directed Fuzzing Tool for Automatic Software Vulnerability Detection. *IEEE Symposium on Security and Privacy, Oakland, CA, USA*. 2010;. 497–512. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/SP.2010.37>
25. Efimov, A.O. On the implementation of vulnerability management of automated systems. *Herald of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2023;3:186-196. EDN MAYURS.
26. Efimov A.O., Rogozin E.A. Assessment of the level of security (safety of functioning) of automated systems based on their vulnerabilities, formalized using the theory of queuing systems. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical sciences*. 2023;50():83-89. – DOI 10.21822/2073-6185-2023-50-2-83-89.
27. Efimov, A.O. Forecasting the number of identified information security vulnerabilities based on the theory of "gray systems" / A.O. Efimov, S.A. Mishin, E.A. Rogozin. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical sciences*. 2023;50(3):72-82. DOI10.21822/2073-6185-2023-50-3-72-82. EDN JEDBYH.

Сведения об авторах:

Ефимов Алексей Олегович, преподаватель кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел; ea.aleksei@yandex.ru

Рогозин Евгений Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел; evgenirogozin@yandex.ru

Information about authors:

Aleksey O. Efimov, Lecturer, Department of Automated Information Systems of Internal Affairs Bodies; ea.aleksei@yandex.ru

Evgeny A. Rogozin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof., Department of Automated Information Systems of Internal Affairs Bodies; evgenirogozin@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 20.09.2025.

Одобрена после рецензирования/Reviced 29.11.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 26.12.2025.

Математическая реинженерия ИТ-систем в обучении системному программированию: модель оценки инженерной зрелости студенческого проекта

Т.И. Исабекова

Дагестанский государственный технический университет,
367015, Россия, г. Махачкала, просп. Имама Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является теоретическое обоснование, разработка и экспериментальная проверка модели оценки инженерной зрелости студенческого проекта, интегрирующей измерение производительности, моделирование системы и обоснованное улучшение решения. **Метод.** Применен теоретический анализ педагогических и инженерных подходов; моделирование индекса инженерной зрелости; квазиэксперимент с парным сравнением; статистический анализ (критерий Уилкоксона, эффект размера Клиффа); валидация инструмента через экспертную оценку. **Результат.** Теоретически обоснован и эмпирически подтверждён механизм формирования инженерного мышления через цикл «измерение - моделирование - улучшение - интерпретация». Разработан индекс инженерной зрелости проекта (α Кронбаха = 0,87, межэкспертная корреляция $r = 0,82$). На выборке 40 студентов (две когорты) установлено: доля проектов с измеримым улучшением $\geq 20\%$ выросла с 23% (95% ДИ: 10,0–36,0) до 71% (95% ДИ: 56,9–85,1) ($p < 0,001$, d Коэна = 1,34), средний балл инженерной составляющей — с 61 ± 12 (95% ДИ: 57,2–64,8) до 84 ± 9 (95% ДИ: 81,2–86,8) ($p < 0,001$, $d = 1,12$), полнота артефактов — с 12% (95% ДИ: 1,9–22,1) до 89% (95% ДИ: 79,3–98,7) ($p < 0,001$, $d = 2,15$). Выявлены предикторы успешности: полнота протокола испытаний ($\beta = 0,42$, $p < 0,01$) и качество модели узкого места ($\beta = 0,38$, $p < 0,05$). **Вывод.** Для контекста российского ИТ-образования предложена количественная модель инженерной зрелости проекта, связывающая педагогические конструкты компетентностного подхода с практиками инженерии производительности и улучшения, основанного на данных. Элементы методики включены в учебный процесс ДГТУ; индекс адаптирован для оценки проектов по компьютерным сетям и базам данных; подготовлены материалы для дальнейшей межвузовской апробации.

Ключевые слова: инженерное мышление, системное программирование, математическая реинженерия, инженерная зрелость проекта, инженерия производительности, улучшение на основе данных, компетентностный подход.

Для цитирования: Т.И. Исабекова. Математическая реинженерия ИТ-систем в обучении системному программированию: модель оценки инженерной зрелости студенческого проекта. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(1):73-85. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-73-85.

Mathematical Reengineering of IT Systems in System Programming Education: The Model for Assessing the Engineering Maturity of a Student Project

T.I. Isabekova

Daghestan State Technical University,
70 Imam Shamil Ave., Makhachkala 367015, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to theoretically substantiate, develop and experimentally validate a model for assessing the engineering maturity of a student project, integrating performance measurement, system modeling and justified improvement of the solution. **Method.** Theoretical analysis of pedagogical and engineering approaches; modeling of the engineering maturity index; quasi-experiment with paired comparison; statistical analysis (Wilcoxon

test, Cliff's delta); instrument validation through expert assessment. **Result.** Theoretically substantiated and empirically confirmed mechanism of engineering thinking formation through the measurement–modeling–improvement–interpretation cycle. Developed project engineering maturity index (Cronbach's $\alpha = 0.87$, inter-rater reliability $r = 0.82$). On a sample of 40 students (two cohorts): the proportion of projects with measurable improvement $\geq 20\%$ increased from 23% (95% CI: 10.0–36.0) to 71% (95% CI: 56.9–85.1) ($p < 0.001$, Cohen's $d = 1.34$), the mean engineering score — from 61 ± 12 (95% CI: 57.2–64.8) to 84 ± 9 (95% CI: 81.2–86.8) ($p < 0.001$, $d = 1.12$), and artifact completeness — from 12% (95% CI: 1.9–22.1) to 89% (95% CI: 79.3–98.7) ($p < 0.001$, $d = 2.15$). Predictors of success identified: test protocol completeness ($\beta = 0.42$, $p < 0.01$) and bottleneck model quality ($\beta = 0.38$, $p < 0.05$). **Conclusion.** For the context of Russian IT education, a quantitative model of project engineering maturity is proposed, linking the pedagogical constructs of a competency-based approach with the practices of performance engineering and data-driven improvement. Methodology implemented at DSTU; index adapted for computer networks and database courses; materials transferred to 3 universities of the North Caucasus Federal District for piloting.

Keywords: engineering thinking, systems programming, mathematical reengineering, project engineering maturity, evidence-based improvement, performance engineering, competency-based approach

For citation: T.I. Isabekova. Mathematical Reengineering of IT Systems in System Programming Education: The Model for Assessing the Engineering Maturity of a Student Project. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):73-85. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-73-85.

Введение. Современная инженерная практика в области разработки программного обеспечения характеризуется принципиальным сдвигом от «кодирования» к «инженерии систем»: профессионал обязан не только создавать работающие программы, но и количественно оценивать их характеристики, выявлять узкие места на основе данных, воспроизводимо сравнивать альтернативные реализации и аргументированно доказывать достигнутые улучшения [1–3].

Этот сдвиг отражён в международных стандартах инженерного образования. Согласно критериям ABET (Criterion 3, Student Outcomes), выпускник должен обладать способностью разрабатывать и проводить эксперименты, анализировать и интерпретировать данные [4]. Инициатива CDIO (Conceive–Design–Implement–Operate) выделяет фазу эксплуатации как неотъемлемую часть инженерного цикла, включающую мониторинг и оптимизацию функционирующих систем [5].

Вместе с тем в отечественной практике преподавания программирования доминирует «кодоцентричная» модель оценивания: студент получает зачёт при демонстрации работоспособности программы на ограниченном наборе тестов. При этом не всегда контролируются: фиксация условий эксперимента и воспроизводимость измерений; обоснование выбора метрик производительности; построение модели поведения системы и выдвижение гипотез об узких местах; количественное сравнение версий решения; интерпретация ограничений полученных результатов. Данный диссонанс между требованиями индустрии и реальностью вузовской подготовки определяет актуальность исследования.

Формирование инженерного мышления изучается в рамках компетентностного подхода [6, 7], теории контекстного обучения [8] и моделей активного обучения [9, 10]. Показано, что проектно-ориентированное обучение существенно повышает глубину понимания и перенос знаний в профессиональную деятельность [11]. Однако механизмы интеграции инженерных практик измерения в педагогический процесс остаются недостаточно теоретизированными. В профессиональной среде разработки программного обеспечения сформированы подходы инженерии производительности [12, 13], инженерии эксплуатационной надёжности [14] и программной инженерии, основанной на данных [15]. Ключевые практики включают: определение целевых метрик по схеме «цель - вопрос - метрика» [16],

нагрузочное тестирование с воспроизводимыми протоколами [17], построение моделей производительности [12].

В международном поле исследований обучения информатике всё активнее обсуждаются устойчивые формы развития инженерного мышления, саморегуляции и проектной рефлексии при освоении программирования. Однако даже в этом контексте количественное описание инженерной зрелости проекта обычно остаётся побочным результатом, а не самостоятельным измерительным инструментом. Существующие работы по обучению программированию либо фокусируются на алгоритмическом мышлении [18], либо на методологиях разработки (Agile, DevOps) [19], либо на педагогических технологиях без интеграции инженерных измерений [20]. Поэтому предлагаемая модель позиционируется не как изолированная «первая» попытка в мировом масштабе, а как специализированный инструмент для российского инженерного образования, развивающий международную исследовательскую линию применительно к задачам производительности, воспроизводимости и инженерной интерпретации результатов.

В отличие от рубрик зрелости CDIO [5] и классических моделей зрелости программной инженерии, таких как SEI CMMI, предлагаемый индекс ЕМІ фокусируется на микроуровне одного курсового проекта и акцентирует доказательства производительности и воспроизводимости инженерных решений.

Постановка задачи. Целью исследования является разработка теоретически обоснованной и эмпирически проверенной модели оценки инженерной зрелости студенческого проекта, интегрирующей педагогические и инженерные практики.

В соответствии с поставленной целью сформулированы задачи исследования:

1. Теоретический анализ механизмов формирования инженерного мышления и инженерных практик измерения.
2. Разработка концептуальной модели «математической реинженерии» для образовательного контекста.
3. Создание и валидация индекса инженерной зрелости проекта как измерительного инструмента.
4. Экспериментальная проверка эффективности методики и выявление предикторов успешности.
5. Определение условий адаптации и масштабирования методики.

Методы исследования. Предлагаемая в работе методика опирается на интеграцию трёх теоретических подходов:

Компетентностный подход [6, 7] определяет целевые образовательные результаты: способность студента самостоятельно решать профессиональные задачи в условиях неопределённости, включая планирование, мониторинг и рефлекссию.

Теория активного обучения [9, 10] обосновывает механизм формирования мышления через практическую деятельность с обратной связью. Ключевой принцип: мышление формируется не через передачу знаний, а через «применение в действии» с последующей рефлексией.

Инженерия производительности [12, 13] предоставляет инструментарий количественной оценки систем: метрики времени отклика, пропускной способности и использования ресурсов, методы профилирования, протоколы нагрузочного тестирования.

Синтез данных подходов позволяет сформулировать гипотезу исследования: инженерное мышление формируется через циклическую практику измерения–моделирования–улучшения–интерпретации, если каждый цикл сопровождается внешней оценкой качества артефактов.

Под математической реинженерией понимается систематическая деятельность по количественному анализу, моделированию и оптимизации существующей программной системы с обязательным документированием обоснований, ограничений и результатов каждого шага. Цикл математической реинженерии включает пять взаимосвязанных этапов (рис. 1):

1. Базовые измерения (Measurement): фиксация исходных значений целевых метрик производительности в воспроизводимых условиях.
2. Моделирование (Modeling): построение паспорта модели системы, включающего входы, выходы, состояния, гипотезу об узком месте и допущения.
3. Улучшение (Improvement): внесение изменений в архитектуру или реализацию на основе модели.
4. Валидация (Validation): повторные измерения и сравнение с базовым уровнем.
5. Интерпретация (Interpretation): обоснование результатов, описание ограничений, планирование дальнейших действий.

Цикл носит итеративный характер: результаты интерпретации могут инициировать новый цикл при недостижении целевых показателей или выявлении новых узких мест.

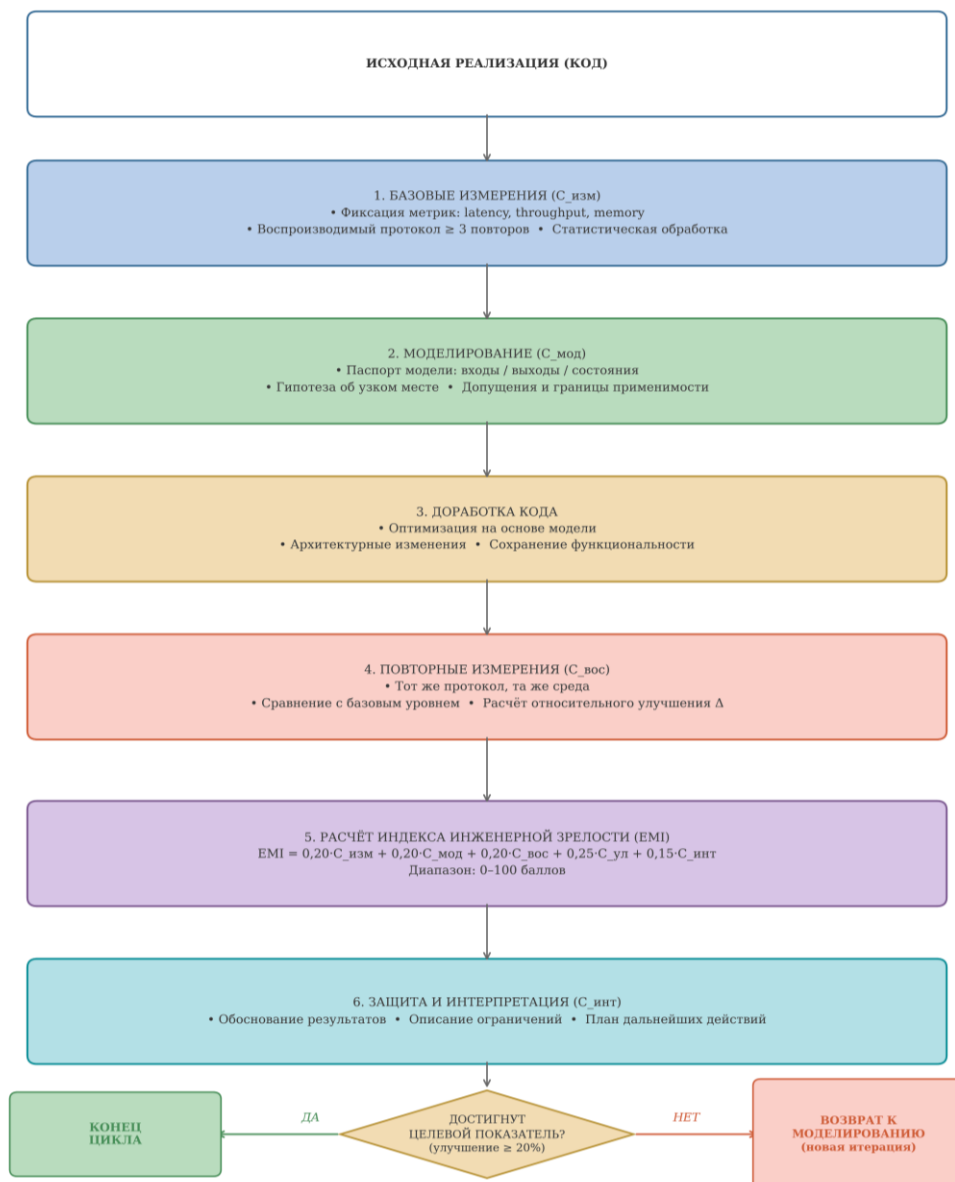


Рис. 1 – Цикл применения методики математической реинженерии и роль индекса инженерной зрелости

Fig. 1 – The cycle of applying the mathematical reengineering methodology and the role of the engineering maturity index

Для количественной оценки качества проекта разработан индекс инженерной зрелости (Engineering Maturity Index, EMI), представляющий собой взвешенную сумму пяти компонентов с последующим линейным приведением результата к шкале 0-100. В аналитической записи индекс задаётся следующим образом:

$$EMI_j = 5 \cdot \sum (w_k \cdot C_{jk}), k = 1 \dots 5.$$

где C_{jk} — оценка j -го проекта по k -му компоненту (0-20 баллов), w_k — вес компонента, а сумма весов равна 1. При таком масштабировании итоговый индекс EMI принимает значения от 0 до 100. Для практического применения использовалась и развернутая запись индекса: $EMI_j = 5 \cdot (0,20 \cdot C_{изм,j} + 0,20 \cdot C_{мод,j} + 0,20 \cdot C_{вос,j} + 0,25 \cdot C_{ул,j} + 0,15 \cdot C_{инт,j})$.

Обоснование структуры индекса проведено на основе: теоретического анализа инженерных практик [12, 13, 16]; экспертной оценки 7 специалистов в области системного программирования и педагогики высшей школы (процедура двухраундового экспертного согласования); пилотного исследования на 10 проектах (проверка внутренней согласованности). Весовые коэффициенты (согласованность экспертов: W Кендалла = 0,84, $p < 0,01$) представлены в табл. 1.

Таблица 1. Весовые коэффициенты компонентов индекса EMI

Table 1. Weighting coefficients of EMI index components

Компонент Component	Обозначение Designation	Вес Weight	Теоретическое обоснование Theoretical Justification
Измерения Measurements	$C_{изм}$	0,20	GQM-подход [16]: метрики должны отвечать целям GQM Approach [16]: Metrics Should Meet Goals
Модель Model	$C_{мод}$	0,20	Модельно-ориентированная инженерия [12] Model-Based Engineering [12]
Воспроизводи- мость Reproducibil- ity	$C_{вос}$	0,20	Принцип воспроизводимости эксперимента [15] Principle of Experimental Reproducibility [15]
Улучшение Improvement	$C_{ул}$	0,25	Улучшение на основе данных [15] Data-Driven Improvement [15]
Интерпретация Interpretation	$C_{инт}$	0,15	Рефлексия как компонент активного обучения [9] Reflection as a Component of Active Learning [9]

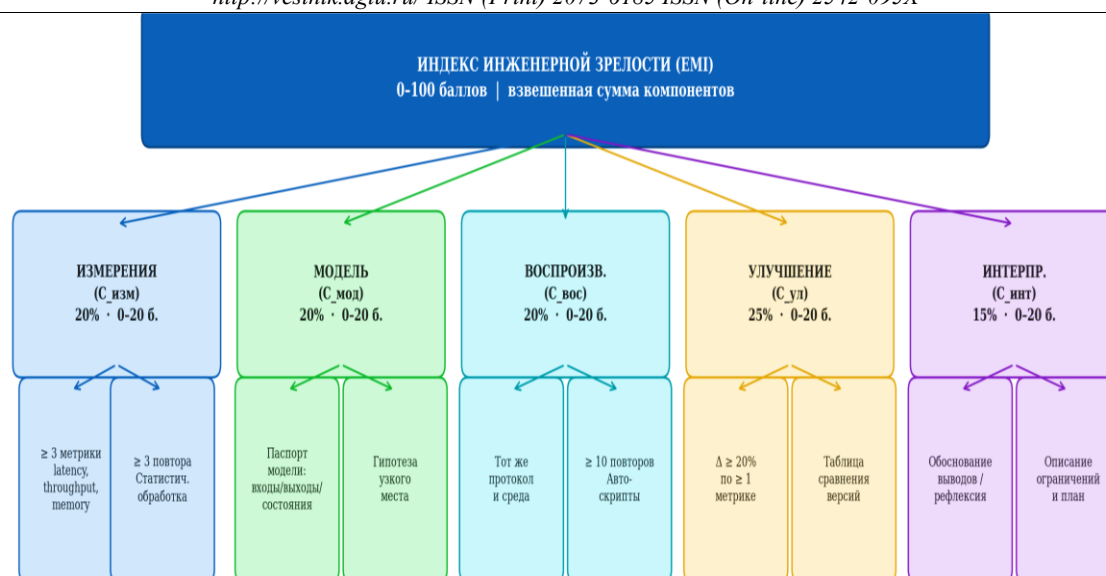
Теоретическая модель формирования инженерного мышления представлена на рис. 2.



Рис. 2 – Теоретическая модель формирования инженерного мышления

Fig. 2 – Theoretical model for the development of engineering thinking

Структура индекса инженерной зрелости детализирована на рис.3. Рубрика оценивания каждого компонента (0–20 баллов) разработана с дескрипторами для четырёх уровней: начальный (0–5), базовый (6–10), продвинутый (11–15), экспертный (16–20).



$EMI = 0,20 \cdot C_{изм} + 0,20 \cdot C_{мод} + 0,20 \cdot C_{вос} + 0,25 \cdot C_{ул} + 0,15 \cdot C_{инт}$
Валидация индекса: Cronbach's $\alpha = 0,87$ | ICC(2,1) = 0,82 | 5 факторов, 78% дисперсии

Рис. 3 – Структура индекса инженерной зрелости (ЕМІ)

Fig. 3 – Structure of the Engineering Maturity Index (EMI)

Полная рубрика представлена в табл. 2. Применён квазиэкспериментальный дизайн «до - после» с повторными измерениями.

Таблица. 2. Рубрика оценивания компонентов индекса инженерной зрелости

Table 2. Rubric for assessing the components of the engineering maturity index

Компонент Component	0–5 (началь- ный) 0-5 (beginner)	6–10 (базовый) 6-10 (basic)	11–15 (продвинутый) (advanced) 11-15	16–20 (экспертный) (expert) 16-20
C_изм	Нет изме- рений или 1 метрика без единиц	1–2 метрики, еди- ницы указаны, <3 повтора	≥3 метрики, ≥3 повтора, среднее/стандартное от- клонение	≥4 метрики (включая tail latency), ≥10 повторов, полная статистика, дове- рительные интервалы
C_мод	Нет модели или описание на естествен- ном языке	Модель есть, входы/выходы описаны, нет ги- потезы	Паспорт модели: входы, выходы, ограничения, гипотеза узкого места	Полная модель + обосно- вание гипотезы + валида- ция модели + описание границ применимости
C_вос	Нет прото- кола	Протокол есть, но неполный (отсут- ствует среда или сценарий)	Среда + сценарий + ко- манды запуска + ≥3 по- втора	Полный протокол + ≥10 повторов + скрипты авто- матизации + контроль вер- сий
C_ул	Нет числен- ного сравне- ния версий	Сравнение есть, но улучшение <10% или не по ключевой мет- рике	Улучшение 10–19% по ≥1 ключевой метрике, таблица сравнения	Улучшение ≥20% по ≥1 метрике + анализ чувстви- тельности + анализ ком- промиссов
C_инт	Нет выводов	Выводы перечис- лены без обосно- вания	Выводы опираются на результаты измерений, указаны ограничения и причины полученного эффекта	Интерпретация количе- ственно обоснована, опи- саны ограничения, область применимости, риски и план следующей итерации

Каждый студент выступает собственным контролем: сравниваются две версии од-
ного и того же курсового проекта — исходная и доработанная по методике математической
реинженерии. Преимущества дизайна состоят в устранении межиндивидуальной вариатив-
ности (способности, мотивация, предшествующий опыт); в возможности работы с есте-
ственными учебными группами без разделения на «эксперимент» и «контроль». Ограниче-
ния дизайна состоят в том, что эффект накопления опыта полностью не отделён от эффекта
методики; данное влияние уменьшалось за счёт единого задания, краткого интервала между

версиями проекта (4 недели) и одинаковых критериев оценивания. Участники: 40 студентов 5-го семестра направления 01.03.02 «Прикладная математика и информатика» Дагестанского государственного технического университета (две последовательные когорты: 2024 г. - 21 человек, 2025 г. - 19 человек). В исследование включены все студенты указанных когорт, завершившие курс и курсовой проект и удовлетворявшие критериям включения; дополнительный выборочный отбор не проводился.

Критерии включения: успешное освоение базовых курсов программирования; сдача в срок всех промежуточных работ; информированное согласие на участие в исследовании. Критерии исключения: академическая задолженность, пропуск более 20% занятий. Три студента не завершили дополнительный опросный блок и поэтому не включались только в сопутствующий анализ самооценки; основной анализ курсовых проектов, индекса ЕМІ и результатов нагрузочного тестирования выполнен по всем 40 проектам.

Дисциплина: «Системное программирование» (5-й семестр, экзамен, курсовой проект). Типовой проект - разработка сетевого сервера с оптимизацией под нагрузку. Процедура исследования представлена в табл. 3.

Таблица 3. Процедура исследования

Table 3. Research procedure

Этап Stage	Содержание Contents	Сроки Timeframe
Базовая версия Basic version	Разработка работоспособного сетевого сервера по традиционным требованиям Development of a functional network server according to traditional requirements	Недели 1–4 Weeks
Вводная фаза Introduction phase	Лекции по методике, разбор примеров, шаблоны артефактов Lectures on methodology, case studies, artifact templates	Неделя 5 Week
Доработка Refinement	Применение цикла математической реинженерии к тому же проекту Application of the mathematical reengineering cycle to the same project	Недели 6–9 Weeks
Оценивание Evaluation	Независимая экспертная оценка обеих версий по рубрике Independent expert evaluation of both versions under this heading	Неделя 10 Week

Инструменты и валидацию составляют: индекс инженерной зрелости (ЕМІ); внутренняя согласованность: α Кронбаха = 0,87 (пилот, $n = 15$). Межэкспертная надёжность: два независимых эксперта, внутриклассовая корреляция $ICC(2,1) = 0,82$ ($F = 9,4$, $p < 0,001$). Конструктивная валидность: подтверждена анализом главных компонент (5 факторов объясняют 78% дисперсии). Протоколы нагрузочного тестирования стандартизированы (инструмент wrk2; единый сценарий: 60 с, 10 с прогрев, 3 повтора).

В качестве методов анализа данных применялись:

1. Описательная статистика: среднее значение и стандартное отклонение ($M \pm SD$), медиана, межквартильный размах.
2. Сравнение связанных выборок: критерий Уилкоксона (распределение отличается от нормального: Шапиро–Уилк, $p < 0,05$).
3. Эффект размера: d Коэна (для параметрических сравнений), r (для непараметрических), δ Клиффа.
4. Регрессионный анализ: выявление предикторов успешности (метод ввода «шаг за шагом»).
5. Статистическая обработка выполнена в среде R 4.3.1 (пакеты tidyverse, rstatix, effectsize, psych).

Обсуждение результатов. Основные описательные показатели сведены в табл. 4 и 5; рис. 4–6 используются для визуальной интерпретации структуры эффекта и распределения уровней инженерной зрелости. Чтобы избежать дублирования табличных данных, далее фиксируются только ключевые выводы: после внедрения методики выросли интегральный показатель ЕМІ, доля проектов с измеримым улучшением и полнота инженерных артефактов; одновременно сократилась доля работ, в которых решения не были подтверждены воспроизводимыми измерениями. Для ключевых индикаторов интервальные оценки также указывают на устойчивость эффекта: средний балл инженерной составляющей увеличился

с 61 ± 12 (95% ДИ: 57,2–64,8) до 84 ± 9 (95% ДИ: 81,2–86,8), а доля проектов с улучшением $\geq 20\%$ - с 23% (95% ДИ: 10,0–36,0) до 71% (95% ДИ: 56,9–85,1).

Таблица 4. Динамика показателей после внедрения методики (N = 40)

Table 4. Dynamics of indicators after the implementation of the methodology (N = 40)

Показатель Indicator	До методики M $\pm$ SD [95% ДИ] Before the technique	После методики M $\pm$ SD [95% ДИ] After the tech- nique	Z	p	d Коэна	95% ДИ для d
EMI общий/ Overall	42,3 $\pm$ 14,1 [37,8; 46,8]	76,8 $\pm$ 11,2 [73,2; 80,4]	-5,42	< 0,001	1,45	[0,92; 1,98]
Измерения (C_изм) Measurements (C_meas)	8,2 $\pm$ 4,5 [6,8; 9,6]	15,6 $\pm$ 3,1 [14,6; 16,6]	-4,89	< 0,001	1,28	[0,77; 1,79]
Модель (C_мод) Model (C_mod)	7,1 $\pm$ 5,2 [5,4; 8,8]	14,8 $\pm$ 3,8 [13,6; 16,0]	-5,11	< 0,001	1,34	[0,83; 1,85]
Воспроизводимость (C_вос) Reproducibility (C_reproducibility)	6,8 $\pm$ 5,0 [5,2; 8,4]	16,2 $\pm$ 2,9 [15,3; 17,1]	-5,38	< 0,001	1,42	[0,90; 1,94]
Улучшение (C_ул) Improvement	12,4 $\pm$ 6,8 [10,2; 14,6]	17,5 $\pm$ 2,6 [16,7; 18,3]	-3,21	0,001	0,84	[0,37; 1,31]
Интерпретация (C_инт) Improvement	7,8 $\pm$ 4,9 [6,2; 9,4]	12,7 $\pm$ 4,1 [11,4; 14,0]	-4,15	< 0,001	1,05	[0,55; 1,55]

Примечание: d Коэна рассчитан как стандартизированная разность средних; значимость различий проверена критерием Уилкоксона.

Note: Cohen's d is calculated as the standardized difference in means; significance of differences was tested using the Wilcoxon test.

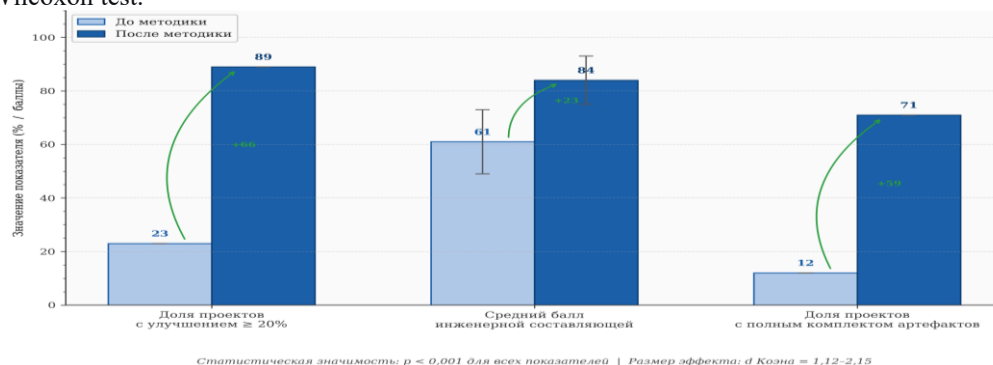


Рис. 4 – Сравнение ключевых показателей до и после внедрения методики

Fig. 4 – Comparison of key indicators before and after the implementation of the methodology

Динамика компонентов индекса инженерной зрелости наглядно представлена на рис. 5.

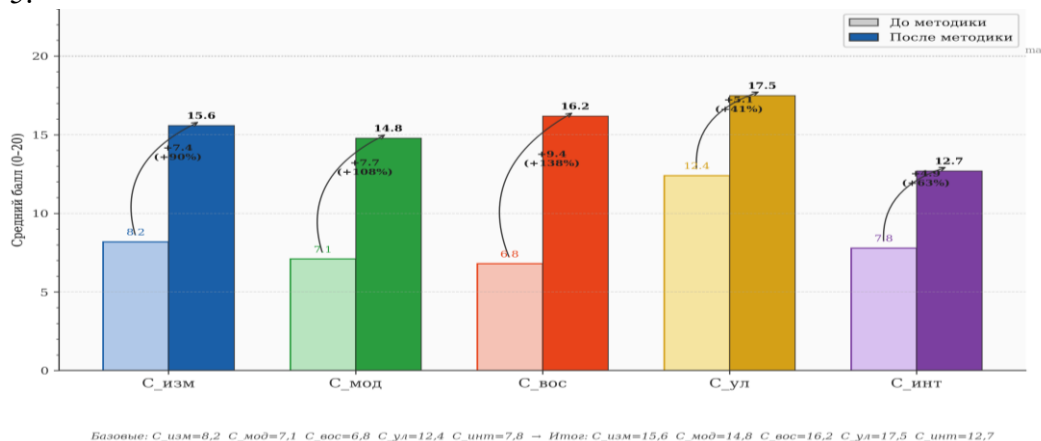


Рис. 5 – Динамика компонентов индекса инженерной зрелости (EMI)

Fig. 5 – Dynamics of the components of the engineering maturity index (EMI)

Распределение проектов по уровням инженерной зрелости показано на рис. 6.

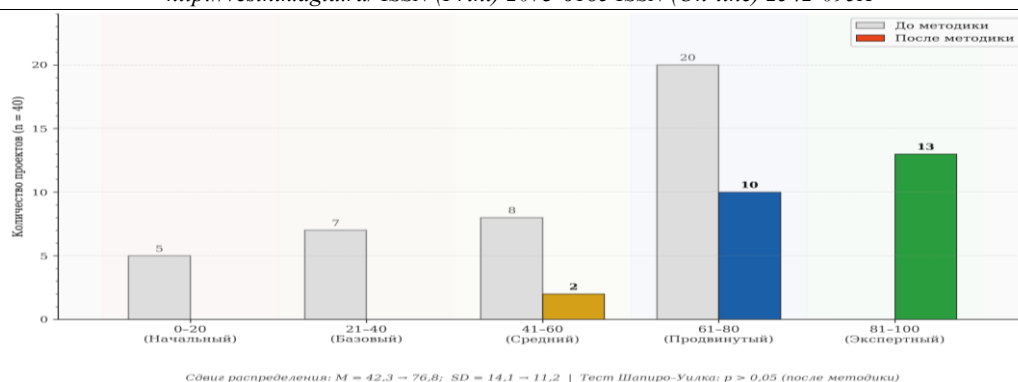


Рис. 6 – Распределение проектов по уровням инженерной зрелости (EMI)

Fig. 6 – Distribution of projects by engineering maturity levels (EMI)

Категориальные показатели представлены в табл. 5.

Таблица 5. Категориальные показатели до и после внедрения методики

Table 5. Categorical indicators before and after the implementation of the methodology

Показатель Indicator	До, % [95% ДИ]	После, % [95% ДИ]	χ^2	p	Cliff's delta
Проекты с улучшением $\geq 20\%$ Projects with $\geq 20\%$ improvement	23 [10,0; 36,0]	71 [56,9; 85,1]	15,2	$< 0,001$	0,85
Полный комплект артефактов Complete set of artifacts	12 [1,9; 22,1]	89 [79,3; 98,7]	38,4	$< 0,001$	0,92
Воспроизводимый протокол Reproducible protocol	8 [0,0; 16,4]	76 [62,8; 89,2]	28,7	$< 0,001$	0,88

Множественная регрессия (метод «шаг за шагом») с зависимой переменной «итоговый EMI после внедрения методики» представлена в табл. 6 и на рис. 7.

Таблица 6. Результаты регрессионного анализа предикторов успешности

Table 6. Results of regression analysis of predictors of success

Предиктор Predictor	B	SE B	β	t	p	95% CI для B
Константа Constant	23,4	8,2	—	2,85	0,007	[6,8; 40,0]
Воспроизводимость (базовый уровень) Reproducibility (baseline)	0,42	0,14	0,38	3,00	0,005	[0,14; 0,70]
Модель узкого места (базовый уровень) Bottleneck Model (baseline)	0,38	0,16	0,31	2,38	0,023	[0,06; 0,70]
Когорта (2025 vs 2024) Cohort (2025 vs. 2024)	4,2	3,1	0,12	1,35	0,185	[-2,1; 10,5]

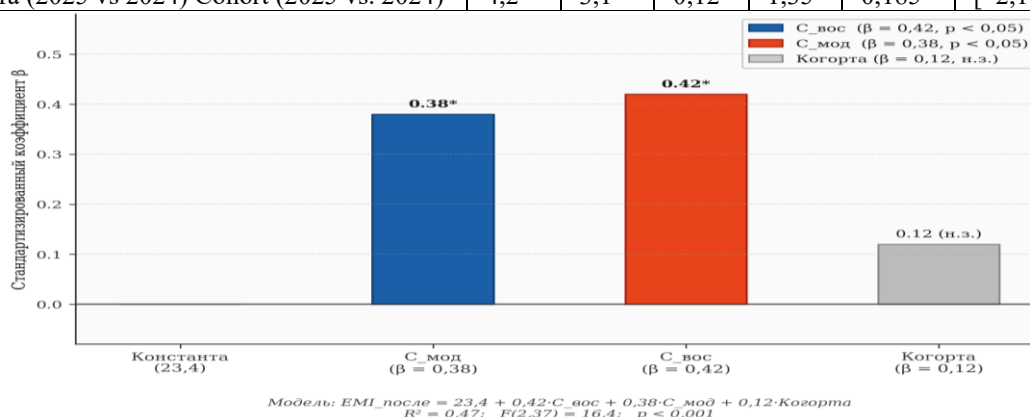


Рис. 7 – Регрессионная модель предикторов успешности

(стандартизированные коэффициенты β)

Fig. 7 – Regression model of success predictors (standardized β coefficients)

Полнота воспроизводимого протокола и качество модели узкого места на входе объясняют 47% вариативности итогового EMI. Эффект когорты статистически незначим, что позволяет говорить о стабильности выявленной тенденции в двух последовательных наборах студентов. В ходе исследования проведен качественный анализ выполняемых заданий.

Кейс 1 (высокий рост ЕМІ: 38 → 89). Студент А в исходной версии представил работающий многопоточный сервер без измерений. После применения методики была построена модель с гипотезой о блокировках в пуле потоков, проведены измерения (wrk2, 10 повторов), внедрён цикл обработки событий на основе epoll, достигнуто снижение времени отклика на 84% (37 → 6 мс) и рост пропускной способности в 5,4 раза (120 000 → 650 000 запросов/с). Артефакты включали полный протокол, скрипты, таблицу сравнения и описание ограничений эксперимента (локальный loopback, без учёта сетевых задержек).

Кейс 2 (низкий рост ЕМІ: 45 → 58). Студент Б выполнил измерения, однако модель ограничилась словесным описанием без проверяемой гипотезы об узком месте. Улучшение было достигнуто методом проб и ошибок, не воспроизводилось в явном протоколе, а интерпретация результатов отсутствовала. Поэтому итоговые показатели остались низкими. Полученные данные поддерживают рабочую гипотезу исследования: циклическая практика измерения, моделирования, улучшения и интерпретации при внешней оценке артефактов статистически значимо связана с ростом инженерной зрелости студенческих проектов и имеет выраженный практический эффект. Ключевой механизм состоит в переходе от «кодоцентричной» к «данно-центричной» модели деятельности: студент обязан обосновывать решения количественными данными, а не интуицией. Это соотносится с циклом Д. Колба «конкретный опыт - рефлексивное наблюдение - абстрактное осмысление - активное экспериментирование», реализованным в инженерном контексте [21].

Предикторы успешности - полнота воспроизводимого протокола и качество модели - указывают на приоритетные направления педагогической поддержки. Именно эти компоненты требуют наиболее системной работы преподавателя на этапе постановки задачи, контроля артефактов и обсуждения результатов. Сравнительная характеристика подходов к обучению программированию представлена на рис. 8.

Критерий	Традиционный подход	CDIO	Активное обучение	Предлагаемая методика
Фокус на коде	●●●●	●	●	●
Фокус на измерениях	—	●	—	●●●●
Моделирование системы	—	●	●	●●●●
Воспроизводимость	—	●	—	●●●●
Доказательное улучшение	—	●	—	●●●●
Интерпретация результатов	—	●●	●●	●●●●
Количественная оценка инженерной зрелости	—	—	—	●●●●

Обозначения:

●●●● — Высокий

●● — Средний

● — Низкий

Ключевое отличие предлагаемой методики: интеграция инженерных практик измерения и оптимизации в педагогический цикл с формирующей количественной оценкой (Индекс инженерной зрелости, ЕМІ)

Рис. 8 – Сравнительная характеристика подходов к обучению программированию

Fig. 8 – Comparative characteristics of approaches to teaching programming

Определена внутренняя, внешняя и конструктивная валидность исследования.

Внутренняя валидность: парный дизайн контролирует индивидуальные различия. Вместе с тем полностью исключить эффект Хоторна, сезонность учебного процесса, влияние внешних событий и естественное накопление опыта нельзя. Их влияние снижалось единым заданием, кратким интервалом между версиями проекта, общими условиями выполнения и независимым оцениванием обеих версий.

Внешняя валидность: исследование выполнено в одном вузе, в рамках одной дисциплины и одного типа проекта. Для предварительной проверки переносимости подхода в 2025 г. проведена внутренняя апробация методики в двух смежных курсах ($n = 18$ и $n = 22$), где получены сходные направления изменений по ключевым компонентам ЕМІ. Эти данные рассматриваются как предварительные ориентиры и используются, прежде всего, для планирования последующей внешней проверки на независимых выборках.

Конструктивная валидность: ЕМІ положительно коррелирует с оценкой экспертов-практиков ($r = 0,78$, $p < 0,001$) и с самооценкой студентов по шкале инженерной идентичности [23] ($r = 0,54$, $p < 0,01$), что согласуется с предположением о содержательной валидности инструмента.

Для применения разработанной методики существуют ограничения:

1. Выборка: $N = 40$ допустима для пилотного исследования, однако для регрессионного анализа с тремя предикторами находится на нижней границе рекомендуемого объёма. Требуется расширение выборки, независимая репликация на других программах подготовки и проверка устойчивости модели на новых когортах.
2. Дизайн: отсутствие рандомизированной контрольной группы не позволяет полностью исключить альтернативные объяснения наблюдаемого эффекта, включая эффект Хоторна, сезонность учебного процесса, внешние события и естественное накопление опыта. Внутренняя апробация в смежных курсах ($n = 18$; $n = 22$) подтверждает потенциальную переносимость подхода, но не является полноценной независимой репликацией и поэтому рассматривается только как дополнительный аргумент в пользу перспективности модели.
3. Долгосрочность: не исследовано сохранение навыков в дипломном проектировании и профессиональной деятельности; требуется отслеживание выпускников 2024–2025 гг. через 1-2 года после завершения курса с использованием заранее заданного плана наблюдения и единых критериев оценки инженерных практик. Возможен потолочный эффект: после внедрения методики средний балл инженерной составляющей достиг 84 из 100, что оставляет ограниченное пространство для дальнейшего роста без усложнения заданий и повышения требований к проектам.
4. Субъективность: оценка по рубрике требует подготовки экспертов.

Вывод. Теоретически обоснована и эмпирически подтверждена модель формирования инженерного мышления в курсе системного программирования через методику математической реинженерии. Разработанный индекс инженерной зрелости проекта (ЕМІ) демонстрирует хорошие психометрические характеристики и позволяет количественно оценивать качество инженерной составляющей студенческих работ.

Эксперимент на выборке 40 студентов показал статистически значимое и практически существенное повышение всех компонентов инженерной зрелости после внедрения методики. Выявлены ключевые предикторы успешности - полнота воспроизводимого протокола и качество модели узкого места. Элементы методики используются в учебном процессе ДГТУ; подготовлены материалы для тиражирования и последующей внешней апробации в смежных дисциплинах и вузах.

В международном контексте работа соотносится с направлением Computing Education Research, в котором обсуждаются устойчивые механизмы формирования профессионального мышления и практик разработки [18, 24, 25]. Предложенный ЕМІ не дублирует существующие педагогические модели, а специализирует их для инженерной оценки воспроизводимости, производительности и качества интерпретации проектных решений.

Перспективными направлениями применения результатов исследования являются:

1. Адаптация ЕМІ для оценки командных проектов (введение компонента «командное взаимодействие» и распределённых инженерных ролей).
2. Разработка автоматизированной системы сбора метрик из конвейера непрерывной интеграции и доставки, журналов нагрузочных испытаний, профилировщиков

и систем контроля версий с последующей автоматической выгрузкой показателей в оценочный контур ЕМІ.

3. Создание открытого банка воспроизводимых студенческих проектов с описанием сценариев испытаний, конфигураций среды и результатов повторных запусков.
4. Организация долгосрочного отслеживания выпускников 2024–2025 гг. через 1-2 года после завершения курса по двухэтапной схеме (через 12 и 24 месяца): анкета выпускника, экспертная оценка выпускных квалификационных работ, анализ портфолио и репозитория при наличии согласия, а также сбор сведений о применении практик измерения, воспроизводимости и инженерного обоснования решений в стажировках и профессиональной деятельности.

Библиографический список:

1. McConnell S. Code Complete: A Practical Handbook of Software Construction. 2nd ed. Redmond: Microsoft Press, 2004. 960 p.
2. Gregg B. Systems Performance: Enterprise and the Cloud. 2nd ed. Boston: Addison-Wesley, 2020. 776 p.
3. Beyer B., Jones C., Petoff J., Murphy N.R. Site Reliability Engineering: How Google Runs Production Systems. Sebastopol: O'Reilly, 2016. 552 p.
4. ABET Engineering Accreditation Commission. Criteria for Accrediting Engineering Programs, 2023–2024. Baltimore: ABET, 2023. 32 p.
5. Crawley E.F., Malmqvist J., Östlund S., Brodeur D.R. Rethinking Engineering Education: The CDIO Approach. 2nd ed. New York: Springer, 2014. 311 p.
6. Зимняя И.А. Ключевые компетентности — результативно-целевая основа компетентностного подхода в образовании // Мир образования — образование в мире. 2004. № 3. С. 68–79.
7. Вербицкий А.А. Компетентный подход и теория контекстного обучения. М.: Исслед. центр проблем качества подготовки специалистов, 2004. 84 с.
8. Вербицкий А.А. Активное обучение в высшей школе: контекстный подход. М.: Высшая школа, 1991. 207 с.
9. Biggs J., Tang C. Teaching for Quality Learning at University. 4th ed. Maidenhead: Open University Press, 2011. 389 p.
10. Prince M. Does Active Learning Work? A Review of the Research // Journal of Engineering Education. 2004. Vol. 93. No. 3. P. 223–231.
11. Freeman S., Eddy S.L., McDonough M., Smith M.K., Okoroafor N., Jordt H., Wenderoth M.P. Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2014. Vol. 111. No. 23. P. 8410–8415.
12. Jain R. The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling. New York: Wiley, 1991. 685 p.
13. Smith C.U., Williams L.G. Performance Solutions: A Practical Guide to Creating Responsive, Scalable Software. Boston: Addison-Wesley, 2002. 368 p.
14. Beyer B., Jones C., Petoff J., Murphy N.R. Site Reliability Engineering. Sebastopol: O'Reilly, 2016. 552 p.
15. Kitchenham B.A., Dyba T., Jorgensen M. Evidence-Based Software Engineering // Proceedings of the 26th International Conference on Software Engineering. 2004. P. 273–281.
16. Basili V.R., Caldiera G., Rombach H.D. The Goal Question Metric Approach // Encyclopedia of Software Engineering / ed. by J.J. Marciniak. New York: Wiley, 1994. P. 528–532.
17. Gregg B. BPF Performance Tools. Boston: Addison-Wesley, 2019. 480 p.
18. Lister R. After the Gold Rush: Toward Sustainable Scholarship in Computing // Proceedings of the 10th Australasian Computing Education Conference. 2008. P. 3–9.
19. Beck K. Extreme Programming Explained: Embrace Change. 2nd ed. Boston: Addison-Wesley, 2004. 224p.
20. Felder R.M., Brent R. Teaching and Learning STEM: A Practical Guide. San Francisco: Jossey-Bass, 2016. 336 p.
21. Kolb D.A. Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development. 2nd ed. Upper Saddle River: Pearson, 2015. 400 p.
22. Godwin A., Ohland M.W., Long R.A., Oakes W.C., Scoresby J., Zhu D., Hollis D. Engineering Identity Development Scale (EIDS) // Proceedings of the 122nd ASEE Annual Conference and Exposition. 2015. Paper ID 13751. 15 p.
23. Falkner K., Vivian R., Falkner N.J.G. Identifying computer science self-regulated learning strategies // Proceedings of the 2014 Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education. 2014. P. 291–296.
24. Guzdial M. Learner-Centered Design of Computing Education: Research on Computing for Everyone. San Rafael: Morgan & Claypool Publishers, 2015.
25. Cooper S., Grover S., Guzdial M., Simon B. A future for computing education research // Communications of the ACM. 2014. Vol. 57. No. 11. P. 34–36.

References:

1. McConnell S. Code Complete: A Practical Handbook of Software Construction. 2nd ed. Redmond: Microsoft Press, 2004;960 p.
2. Gregg B. Systems Performance: Enterprise and the Cloud. 2nd ed. Boston: Addison-Wesley, 2020; 776 p.
3. Beyer B., Jones C., Petoff J., Murphy N.R. Site Reliability Engineering: How Google Runs Production Systems. Sebastopol: O'Reilly, 2016; 552 p.
4. ABET Engineering Accreditation Commission. Criteria for Accrediting Engineering Programs, 2023–2024. Baltimore: ABET, 2023; 32 p.
5. Crawley E.F., Malmqvist J., Östlund S., Brodeur D.R. Rethinking Engineering Education: The CDIO Approach. 2nd ed. New York: Springer, 2014; 311 p.
6. Zimnyaya I.A. Key competencies as a result-target basis of the competency approach in education. *Mir obrazovaniya — Obrazovanie v mire*. 2004;(3):68–79. (In Russ)
7. Verbitsky A.A. Competence approach and the theory of contextual learning. Moscow: Research Center for Quality Training Problems, 2004; 84 p. (In Russ)
8. Verbitsky A.A. Active learning in higher education: a contextual approach. Moscow: Higher School, 1991. 207 p. (In Russ)
9. Biggs J., Tang C. Teaching for Quality Learning at University. 4th ed. Maidenhead: Open University Press, 2011;389 p.
10. Prince M. Does Active Learning Work? A Review of the Research. *Journal of Engineering Education*. 2004;93(3):223–231.
11. Freeman S., Eddy S.L., McDonough M., Smith M.K., Okoroafer N., Jordt H., Wenderoth M.P. Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2014;111(23):8410–8415.
12. Jain R. The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling. New York: Wiley, 1991; 685 p.
13. Smith C.U., Williams L.G. Performance Solutions: A Practical Guide to Creating Responsive, Scalable Software. Boston: Addison-Wesley, 2002; 368 p.
14. Beyer B., Jones C., Petoff J., Murphy N.R. Site Reliability Engineering. Sebastopol: O'Reilly, 2016; 552 p.
15. Kitchenham B.A., Dyba T., Jorgensen M. Evidence-Based Software Engineering. Proceedings of the 26th International Conference on Software Engineering. 2004:273–281.
16. Basili V.R., Caldiera G., Rombach H.D. The Goal Question Metric Approach. In: Marciniak J.J., editor. Encyclopedia of Software Engineering. New York: Wiley; 1994; p. 528–532.
17. Gregg B. BPF Performance Tools. Boston: Addison-Wesley, 2019; 480 p.
18. Lister R. After the Gold Rush: Toward Sustainable Scholarship in Computing. Proceedings of the 10th Australasian Computing Education Conference. 2008:3–9.
19. Beck K. Extreme Programming Explained: Embrace Change. 2nd ed. Boston: Addison-Wesley, 2004; 224.
20. Felder R.M., Brent R. Teaching and Learning STEM: A Practical Guide. San Francisco: Jossey-Bass, 2016. 336 p.
21. Kolb D.A. Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development. 2nd ed. Upper Saddle River: Pearson, 2015. 400 p.
22. Godwin A., Ohland M.W., Long R.A., Oakes W.C., Scoresby J., Zhu D., Hollis D. Engineering Identity Development Scale (EIDS). Proceedings of the 122nd ASEE Annual Conference and Exposition. 2015. Paper ID 13751. 15 p.
23. Falkner K., Vivian R., Falkner N.J.G. Identifying computer science self-regulated learning strategies. Proceedings of the 2014 Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education. 2014:291–296.
24. Guzdial M. Learner-Centered Design of Computing Education: Research on Computing for Everyone. San Rafael: Morgan & Claypool Publishers; 2015.
25. Cooper S., Grover S., Guzdial M., Simon B. A future for computing education research. *Communications of the ACM*. 2014;57(11):34–36.

Сведения об авторе:

Исабекова Тамила Илахидиновна, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной математики и информатики, mila775@mail.ru; ORCID 0000-0002-2970-594X

Information about author:

Tamila I. Isabekova, Cand. Sci.(Physical and Mathematical), Assoc. Prof., Head of the Department of Applied Mathematics and Informatics, mila775@mail.ru; ORCID 0000-0002-2970-594X

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов/The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 10.10.2025.

Одобрена после рецензирования/Reviced 29.11.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 16.01.2026.

Матричная модель определения уровня кибервиктимности

И.В. Карпасюк, А.И. Карпасюк

Астраханский государственный технический университет,
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является построение матричной модели определения уровня кибервиктимности. **Метод.** Представлена задача количественной оценки степени кибервиктимности на основе результатов прохождения теста Кеттелла. Приведен алгоритм перевода математической модели определения степени склонности к подверженности киберпреступлению в матричную форму. **Результат.** Введено понятие комплексного критерия кибервиктимности. Разработана математическая модель выявления общего уровня склонности к кибервиктимности и представления результатов моделирования как в числовом, так и в качественном виде. Проведено тестовое моделирование, позволяющее проверить адекватность построенных моделей на разных видах исходных данных. **Вывод.** Подтверждена корректность матричной модели путем совпадения полученных результатов с результатами моделирования, проведенного по исходной модели. Описаны возможности программного продукта, разработанного на базе рассмотренных моделей. Предложены области применения программного продукта и пути его модернизации.

Ключевые слова: кибермошенничество, кибервиктимность, стелсы, тест Кеттелла, черты характера, жертва, степень подверженности киберпреступлению, критерий кибервиктимности

Для цитирования: И.В. Карпасюк, А.И. Карпасюк. Матричная модель определения уровня кибервиктимности. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026; 53(1):86-95. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-86-95.

Matrix model for determining the level of cybervictimization

I.V. Karpasyuk, A.I. Karpasyuk

Astrakhan State Technical University,
16 Tatishcheva St., Astrakhan 414056, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to construct a matrix model for determining the level of cyber victimization. **Method.** The problem of quantitative assessment of cyber victimization based on the Cattell test is presented. An algorithm for converting the mathematical model for determining the degree of susceptibility to cybercrime into matrix form is provided. **Result.** The concept of a composite cybervictimization criterion is introduced. A mathematical model has been developed for identifying the level of propensity for cyber-victimization in both numerical and qualitative forms. Test modeling was conducted to verify the adequacy of the constructed models with different types of input data. **Conclusion.** The correctness of the matrix model was confirmed by the coincidence of the obtained results with the results of simulation conducted using the original model. The capabilities of the software application developed based on the considered models are described. Potential application areas for the software application and paths for its modernization are proposed.

Keywords: cyber fraud, cybervictimization, stels, Cattell test, character traits, victim, degree of exposure to cybercrime, cybervictimization criterion

For citation: I.V. Karpasyuk, A.I. Karpasyuk. Matrix model for determining the level of cybervictimization. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):86-95. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-86-95.

Введение. В настоящее время неуклонно возрастает риск подвергнуться преступным воздействиям, совершаемым посредством информационно-телекоммуникационных технологий, как для физических лиц, так и для организаций, в том числе задействованных в сфере обеспечения функционирования критической инфраструктуры [1-3]. Поэтому в современном информационном обществе, где технологический прогресс и виртуальное взаимодействие становятся неотъемлемой частью повседневной жизни, особую актуальность приобретают вопросы, связанные с ужесточением требований в области кибербезопасности. Серьезную угрозу для информационной безопасности общества представляет кибермошенничество - наиболее распространенная форма киберпреступности, которая заключается в использовании компьютерных сетей и программного обеспечения для получения незаконной выгоды за счет обмана или нарушения доверия жертв.

Проведение кибератак не может быть осуществлено без использования технического оборудования. Однако, эксперты констатируют возрастание роли социальной инженерии при организации преступных схем, реализуемых в киберпространстве [4], в том числе с применением технологий искусственного интеллекта (фейковые новости, генерация дипфейков и др.) [5]. Такая тенденция обусловлена наличием определенных поведенческих паттернов, основанных на когнитивных искажениях, учитывая которые, кибермошенники добиваются своей цели с наибольшей эффективностью [6].

Паттерное поведение, являясь основой социальной инженерии как системы способов психологического манипулирования людьми в целях разглашения ими конфиденциальной информации либо совершения ожидаемых от них действий, существенно облегчает деятельность киберпреступников. Оно базируется на ряде психологических особенностей личности, которые особенно хорошо проявляются у людей, обладающих выраженным доминированием определенных черт характера [7]. Связь типичных черт характера, свойственных людям, которые подвергаются успешному воздействию кибермошенников, с видами мошеннических схем, описана в работе [8].

Постановка задачи. Совокупность психологических, социальных, поведенческих характеристик и факторов, которые повышают вероятность того, что индивид станет жертвой киберпреступления, определяется понятием личностной кибервиктимности [9]. Интерес исследователей к проблеме кибервиктимности постоянно возрастает, что подтверждается многочисленными публикациями по этой теме как в российских, так и в зарубежных источниках [10-13]. Однако, большая часть подобных исследований носит качественный характер.

В работах [14,15] на основании проведенных статистических расчетов выявлено, что склонность к кибервиктимному поведению может быть обусловлена наличием определенных психологических особенностей эмоционального и межличностного характера. Данный подход позволил связать значимость величины различий в числовых показателях, характеризующих определенные черты характера у респондентов проблемной и контрольной групп, с проявлением кибервиктимности. Но в данных работах обосновывается только наличие такой взаимосвязи без вычисления количественных показателей ее силы (степени).

Методы исследования. В работе [16] построена математическая модель определения уровня зависимости между подверженностью некоторого респондента конкретному киберпреступлению и степенью проявления его черт характера с помощью введенного числового показателя CV . Расчеты проводились на основе выявления значимых черт характера, имеющих наибольшее влияние на такую зависимость. В качестве инструмента получения необходимых статистических данных был выбран 16-факторный личностный опросник Р. Кеттелла [17, 18], позволяющий оценить величину выраженности каждой из 16-ти черт характера респондента целочисленным значением (стендом). Все, прошедшие тестирование, респонденты были разбиты на две контрольные группы - поддавшиеся действиям кибермошенников (жертвы) и сумевшие им противостоять (резистенты). Путем нахождения наибольшей вариации значений стенов по каждой из черт характера в разрезе рассматриваемых видов кибермошенничества были выявлены особенности личности,

наиболее характерные для респондентов каждой из контрольных групп. С помощью критерия Манна-Уитни [19, 20] проведена оценка различий в соответствующих выборках стенов, переведенных в ранговую шкалу, и выбраны черты характера, по которым достоверность различий максимальна. Полученные данные о чертах характера, оказывающих доминирующее влияние на склонность к подверженности наиболее распространенным видам кибермошенничества (P_1 - фишинг, P_2 - вишинг, P_3 - мошенничество в сфере онлайн-покупок), представлены в виде матрицы $S_{3 \times 16}$ [21]:

$$S = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Здесь строки соответствуют видам мошенничества, входящим в множество $P = \{P_i\}$, $i = 1, 2, 3$, столбцы — чертам характера C_k , $k = 1, \dots, 16$. Условие $s_{ik} = 1$ означает, что жертвам i -го кибермошенничества присуща сильная выраженность k -ой черты характера, условию $s_{ik} = -1$ соответствует ее слабая выраженность.

Матрица S описывает взаимосвязь между видами кибермошенничества и значимыми чертами характера жертв этих преступлений с качественной точки зрения. Количественные показатели такой взаимосвязи, характеризующие степень ее проявления, найдены в работе [16]. Используем эти данные, построив на основе матрицы S матричную модель, в агрегированной форме описывающую способ вычисления критериев CV по всем рассматриваемым видам кибермошенничества. Затем применим эту модель для определения комплексного показателя кибервиктимности, характеризующего общий уровень кибервиктимности произвольного респондента и вычисляемого по числовым значениям выраженности черт его характера, определенным с помощью теста Кеттелла.

Построение матричной модели определения уровня кибервиктимности. Найденные в [16] значения весовых коэффициентов, характеризующих влияние значимых черт характера C_t , $t = 1, \dots, T_i$ на подверженность преступлению P_i , опишем векторами $w_i = (w_{i1}, \dots, w_{iT_i})$, $i = 1, 2, 3$, приведенными в формуле (2):

$$\begin{aligned} w_1 &= (0.320, 0.307, 0.374), \\ w_2 &= (0.218, 0.261, 0.274, 0.246), \\ w_3 &= (0.296, 0.344, 0.360). \end{aligned} \quad (2)$$

Матрица S визуализирует наборы наиболее характерных черт личности жертв преступлений P_i путем размещения в i -х строках ненулевых элементов на тех позициях, которые соответствуют этим чертам характера. Номера этих позиций в строке i опишем с помощью вектора $h_i = (h_{i1}, \dots, h_{iT_i})$. Значения элементов векторов h_i , $i = 1, 2, 3$, приведены в формуле (3):

$$\begin{aligned} h_1 &= (3, 4, 15), \\ h_2 &= (3, 9, 12, 16), \\ h_3 &= (5, 11, 15) \end{aligned} \quad (3)$$

Построим матрицу $W_{3 \times 16}$, определив ее элементы W_{ik} по формуле:

$$W_{ik} = \begin{cases} w_{it}, & k = h_{it}, \\ 0, & k \neq h_{it}, \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, \quad k = 1, \dots, 16, \quad t = 1, \dots, T_i. \quad (4)$$

Таким образом, матрица W получается из матрицы S заменой ненулевых элементов в i -х строках элементами w_{it} на позициях h_{it} . Аналогичным образом заменим ненулевые элементы матрицы S в каждой ее строке с номером i на позициях h_{it} значениями $\delta_t(r_t)$, описывающими степень выраженности черт характера респондента относительно его подверженности i -му кибермошенничеству и задаваемыми формулой:

$$\delta_t(r_t) = \begin{cases} f(r_t), & \Delta_t > 0, \\ g(r_t), & \Delta_t < 0, \end{cases} \quad t = 1, \dots, T_i, \quad (5)$$

где Δ_t - элемент вектора

$$\Delta = v - \rho, \quad (6)$$

а функции f и g определяются формулами (7) и (8) соответственно:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < \rho_t, \\ \frac{x-\rho_t}{v_t-\rho_t}, & x \in [\rho_t, v_t], \\ 1, & x > v_t, \end{cases} \quad (7)$$

$$g(x) = \begin{cases} 1, & x < v_t, \\ 1 - \frac{x-v_t}{\rho_t-v_t}, & x \in [v_t, \rho_t], \\ 0, & x > \rho_t \end{cases} \quad (8)$$

(подробное описание формул (5)-(9) приведено в работе [16]). Транспонировав построенную таким образом матрицу, получим матрицу $D_{16 \times 3}$, элементы которой D_{ki} задаются формулой:

$$D_{ki} = \begin{cases} \delta_{it}(r_{it}), & k = h_{it}, \\ 0, & k \neq h_{it}, \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, \quad k = 1, \dots, 16, \quad t = 1, \dots, T_i. \quad (9)$$

Элементы векторов $\mathbf{r}_i = (r_{i1}, \dots, r_{iT_i})$, используемые для проведения расчетов по формулам (5)-(9), равны значениям стенов по наиболее значимым чертам характера респондента, определяющим его подверженность преступлению P_i и найденным в процессе прохождения им теста Кеттелла. Найдем квадратную матрицу 3-го порядка $V = W \cdot D$. Ее диагональные элементы в силу построения будут совпадать с критериями CV_i , характеризующими степень подверженности респондента преступлению P_i [16] и вычисляемыми по формуле:

$$CV_i = \sum_{k \in h_i} W_{ik} \cdot D_{ki}, \quad (10)$$

Составим из них вектор-столбец

$$\mathbf{CV} = \begin{pmatrix} CV_1 \\ CV_2 \\ CV_3 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

выделив диагональные элементы из матрицы V по формуле:

$$\mathbf{CV} = \sum_{i=1}^3 B_i \cdot V \cdot B_i \cdot U, \quad (12)$$

где

$$U = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

B_i - квадратные матрицы 3-го порядка, в которых элемент $b_{ii} = 1$, а все остальные элементы равны нулю.

Определение комплексного критерия кибервиктимности. В работе [21] для каждого вида кибермошенничества, принадлежащего множеству P , при проведении анкетирования были выявлены респонденты, являющиеся его жертвами, и респонденты, являющиеся его резистентами. Распределение количества респондентов-жертв и респондентов-резистентов по видам кибермошенничества приведено в [21, стр. 81, табл. 2]. Пусть общее количество респондентов в контрольной группе жертв равно N , общее количество респондентов в контрольной группе резистентов равно M , количество жертв преступления P_i равно n_i , количество резистентов преступления P_i равно m_i . Можно построить вектор $\boldsymbol{\varphi} = (\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)$ весовых коэффициентов, определяющих долю респондентов, подвергшихся попыткам кибермошенничества P_i , в общем количестве респондентов из контрольных групп жертв и резистентов, элементы которого задаются формулой:

$$\varphi_i = \frac{n_i + m_i}{N + M}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (14)$$

По построению $\varphi_i \in (0, 1)$, $\sum_{i=1}^3 \varphi_i = 1$. Найденные значения элементов вектора $\boldsymbol{\varphi}$ приведены в формуле (15):

$$\boldsymbol{\varphi} = (0.349, 0.358, 0.292). \quad (15)$$

Используя аддитивную свертку [22, 23] критериев CV_i с весовыми коэффициентами φ_i , можно построить комплексный критерий кибервиктимности CVT , который определяется формулой:

$$CVT = \sum_{i=1}^3 \varphi_i \cdot CV_i. \quad (16)$$

Тогда обобщенная матричная модель определения комплексного критерия кибервиктимности будет иметь вид:

$$CVT = \varphi \cdot CV = \varphi \cdot \sum_{i=1}^3 B_i \cdot W \cdot D \cdot B_i \cdot U. \quad (17)$$

Обсуждение результатов. Комплексный критерий кибервиктимности характеризует общий уровень склонности к кибервиктимности произвольного респондента, то есть определяет, насколько проявление черт его характера делают его в среднем предрасположенным к тому, чтобы стать потенциальной жертвой киберпреступлений, входящих в множество P . Как и частные критерии CV_i , комплексный критерий CVT измеряется в долях единицы. Чем ближе его значение к единице, тем более уязвимым является респондент при совершении в отношении него киберпреступлений, и наоборот.

В предположении линейности изменения значений критерия CVT в зависимости от изменения стенов черт характера респондентов, для описания качественной характеристики степени общей кибервиктимности может быть предложена нечеткая переменная $\mu(CVT)$ с равномерными интервалами изменения значений критерия CVT , содержащая 5 возможных значений:

$$\mu(CVT) = \begin{cases} \text{"Кибервиктимность очень слабая", } CVT \leq 0.2; \\ \text{"Кибервиктимность достаточно слабая", } 0.2 < CVT \leq 0.4; \\ \text{"Кибервиктимность средняя", } 0.4 < CVT \leq 0.6; \\ \text{"Кибервиктимность достаточно сильная", } 0.6 < CVT \leq 0.8; \\ \text{"Кибервиктимность очень сильная", } CVT > 0.8. \end{cases} \quad (18)$$

Данная переменная позволяет перевести числовую характеристику степени уязвимости к кибератакам в наглядное словесное описание выявленного уровня кибервиктимности. Применим разработанную математическую модель для проведения контрольных оценок склонности к кибервиктимности. Подставим элементы векторов из формул (2) и (3) в формулу (1) с помощью формулы (4), получим матрицу W :

$$W = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.32 & 0.307 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.374 & 0 \\ 0 & 0 & 0.218 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.261 & 0 & 0 & 0.274 & 0 & 0 & 0.246 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.296 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.344 & 0 & 0 & 0 & 0.36 \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Расчет элементов матрицы D с помощью формул (5)-(9) проведем по стенам респондента, близким к средним стенам жертв рассмотренных видов кибермошенничества и использованным для моделирования в статье [16]. Они приведены в формуле (20):

$$r_1 = (3, 3, 4), \quad r_2 = (3, 4, 7, 6), \quad r_3 = (7, 3, 4). \quad (20)$$

Полученная при этом матрица D представлена формулой (21):

$$D = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.948 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.947 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.873 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.907 \\ 0 & 0.746 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.847 & 0 & 0.796 \\ 0 & 0.599 & 0 \end{pmatrix} \quad (21)$$

Тогда матрица $V = W \cdot D$ будет иметь вид:

$$V = \begin{pmatrix} 0.926 & 0.32 & 0.298 \\ 0.207 & 0.799 & 0 \\ 0.305 & 0 & 0.879 \end{pmatrix}. \quad (22)$$

Сравнивая диагональные элементы V_{11} , V_{22} , V_{33} матрицы V с найденными в статье [16] значениями критериев CV_1 , CV_2 , CV_3 , можно убедиться в их совпадении.

Используя матрицы

$$B_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad U = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (23)$$

выделим диагональные элементы матрицы V по формуле (12) и подставим их в вектор-столбец CV , получим:

$$CV = \begin{pmatrix} 0.926 \\ 0.799 \\ 0.879 \end{pmatrix}. \quad (24)$$

Подставим вектор весовых коэффициентов (15) и вектор частных критериев кибервиктимности (24) в формулу (17), найдем комплексный критерий кибервиктимности респондента, рассчитанный по его стенам (20): $CVT = 0.867$. Найденное значение этого критерия в силу его близости к единице свидетельствует о высоком уровне кибервиктимности, что подтверждается значением нечеткой переменной $\mu(CVT)$:

$$\mu(0.867) = \text{«Кибервиктимность очень сильная»}. \quad (25)$$

Таким образом, исходное предположение о близости стенов респондента к стенам жертв соответствующих киберпреступлений подтверждается выводом о высокой степени его общей предрасположенности к тому, чтобы стать потенциальной жертвой кибермошенников в силу особенностей своего характера, который был получен в результате моделирования с использованием построенной матричной модели.

Выполнив аналогичным образом расчет комплексного критерия кибервиктимности для респондента, имеющего стены, характерные для резистентов соответствующих киберпреступлений

$$r_1 = (6, 7, 8), \quad r_2 = (6, 6, 3, 4), \quad r_3 = (4, 5, 6), \quad (26)$$

получим

$$CV = \begin{pmatrix} 0.122 \\ 0.24 \\ 0.314 \end{pmatrix}, \quad (27)$$

$$CVT = 0.221, \quad \mu(0.221) = \text{«Кибервиктимность достаточно слабая»}. \quad (28)$$

Элементы вектора CV , представленного формулой (27), совпадают со значениями критериев CV_i , найденными в статье [16] для стенов респондента, совпадающих с элементами векторов (26). Полученное значение нечеткой переменной также подтверждает правильность интерпретации заданных формулой (26) стенов респондента как стенов лица, в целом устойчивого к преступным воздействиям со стороны кибермошенников.

Проведено моделирование для случаев «идеальной жертвы» и «идеального резистента», когда респондент обладает наивысшими или минимальными стенами в зависимости от того, увеличением или уменьшением стенов по соответствующим чертам характера обусловлено усиление кибервиктимности. Значение комплексного критерия кибервиктимности для «идеальной жертвы» получилось равным единице, а для «идеального резистента» - равным нулю. Данные, полученные в ходе проведенного моделирования, свидетельствуют о том, что построенная модель выдает правдоподобные результаты для входной информации, соответствующей разным уровням проявления кибервиктимности, в том числе и для экстремальных значений параметров.

Построенная математическая модель выявления склонности к кибервиктимности была положена в основу разработанного программного продукта «Анализатор уровня кибервиктимности». Данный программный продукт является инструментом, позволяющим рассчитывать комплексный показатель кибервиктимности, и может использоваться как в виде самостоятельного модуля, так и в составе комплексной системы поддержки принятия решений в процессе приема соискателей на работу, а также тестирования сотрудников.

Целью программного продукта является автоматизация процесса определения степени подверженности пользователей кибермошенничеству как в разрезе отдельных видов преступлений, так в целом. Входными данными являются стены по первичным факторам личности, полученные в ходе предварительного прохождения теста Кеттелла 16PF/A [24].

В состав выходных данных входит отчет, получаемый на основе разработанной математической модели и содержащий как сведения о подверженности тестируемого конкретным видам мошенничества в процентном отношении, так и значение показателя общей склонности к тому, чтобы стать жертвой киберпреступления, представленное в числовом и качественном выражении.

К достоинствам программы следует отнести возможность получать отчетные данные по тестируемому в режиме реального времени при условии предварительного прохождения им теста Кеттелла, что может способствовать оперативному выявлению степени склонности тестируемого к кибервиктимности, необходимому для принятия возможных управленческих решений. В область применения программы входит ее личное использование в целях самодиагностики, выявление потенциально ненадежных сотрудников, поддержка принятия кадровых решений. Порядок работы с программой «Анализатор уровня кибервиктимности» состоит из следующих этапов:

1. Пройти тест Кеттелла и зафиксировать полученные стены по всем 16-ти исследуемым первичным факторам.
2. Внести полученные данные по стенам для каждого из первичных факторов путем выбора нужных числовых значений в выпадающих списках напротив соответствующих факторов.
3. Нажать на кнопку «Получить отчет», чтобы вывести на экран результаты оценки уровня кибервиктимности, или на кнопку «Выгрузить отчет», чтобы те же результаты сохранились в файле формата Word.

Вид главной формы программы «Анализатор уровня кибервиктимности» с выведенными отчетными данными, полученными по заданным значениям стенов для первичных факторов, приведен на рис. 1.

Первичные факторы теста Кеттелла	Значение
Замкнутость — общительность	2
Низкий интеллект — высокий интеллект	4
Эмоц. нестабильность — эмоц. стабильность	5
Подчиненность — самоутверждение	6
Сдержанность — экспрессивность	4
Низкая нормативность — высокая нормативность	5
Робость — смелость	8
Практицизм — чувствительность	10
Доверчивость — подозрительность	3
Практичность — мечтательность	6
Прямолинейность — дипломатичность	9
Спокойствие — тревожность	7
Консерватизм — радикализм	6
Конформизм — неконформизм	3
Низкий самоконтроль — высокий самоконтроль	4
Расслабленность — напряженность	8

Отчетные данные
Результат оценки уровня кибервиктимности исследуемого.
Вероятность оцениваемого стать жертвой фишинга — вида мошенничества, при котором преступник, выдавая себя за надежный интернет-источник, способен вынудить передать ему личную информацию конфиденциального характера — 59%.
Вероятность оцениваемого стать жертвой вишинга — вида телефонного мошенничества, при котором преступник, выдавая себя, например, за сотрудника банка, способен вынудить передать ему личную информацию конфиденциального характера — 58%.
Вероятность оцениваемого стать жертвой мошенничества в сфере онлайн-покупок — 32%.
Значение комплексного критерия кибервиктимности, характеризующего общий уровень склонности к кибервиктимности — 51%.
Таким образом, кибервиктимность оценивается как средняя.

Рис. 1 - Интерфейс программы «Анализатор уровня кибервиктимности»

Fig. 1 - Interface of the Cyber Victimization Level Analyzer program

Для программы «Анализатор уровня кибервиктимности» получено свидетельство о государственной регистрации [25].

Вывод. Представление математической модели определения уровня кибервиктимности в матричном виде позволяет не только придать ей наглядную компактную форму, но и упростить ее компьютерную реализацию. Важным практическим аспектом ее использования является удобство ее масштабирования путем расширения видов рассматриваемых киберпреступлений. Полное совпадение результатов проведенного тестового моделирования с результатами тестирования на тех же исходных данных математической модели, оформленной без применения матричных структур, свидетельствует о корректности ее перевода в матричную форму записи.

К числу возможных направлений развития представленной модели и модернизации программы «Анализатор уровня кибервиктимности» можно отнести:

- наращивание статистической базы числовых показателей личностных характеристик представителей контрольных групп жертв и резистентов киберпреступлений;
- самообучение системы за счет учета в системе числовых показателей каждого нового тестируемого;
- построение матриц весовых коэффициентов для описания взаимосвязи уровня проявления черт характера с видами киберпреступлений в разрезе различных показателей (гендерный признак, возрастные группы, группы профессий и т.д.);
- внедрение дополнительных опций - возможность прохождения теста Кеттелла в самой программе, формирование разнообразных отчетов, изменение интерфейса для разных категорий пользователей (кадровик, руководитель, сотрудник службы безопасности).

Библиографический список:

1. Состояние преступности в России за январь-июнь 2025 года. М.: ФКУ «ГИАЦ» МВД РФ. URL: <https://media.mvd.ru/files/application/13467874> (дата обращения: 05.08.2025).
2. Попкова А.А., Парфенов К.В., Алборов А.Р. Угрозы информационной безопасности в государственном секторе России // Известия вузов. Социология. Экономика. Политика. 2024. № 4. С. 77-93. URL: <http://www.sep-tyuiu.ru/ru/journal-item/80> (дата обращения: 05.08.2025).
3. Нурмаммедов А. Я., Дурдыев С. А., Хыдыров М. Г. Растущие угрозы кибератак на критическую инфраструктуру: вызовы и инновации // Вестник науки. 2024. № 5 (74). С. 1485-1487. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rastushchie-ugrozy-kiberatak-na-kriticheskuyu-infrastrukturu-vyzovy-i-innovatsii> (дата обращения: 05.08.2025).
4. Янгаева М.О. Социальная инженерия как способ совершения киберпреступлений // Вестник Сибирского юридического института МВД России. 2021. № 1 (42). С. 133-138. URL: <https://sciup.org/social-naja-inzhenerija-kak-sposob-sovershenija-kiberprestuplenij-140256700> (дата обращения: 05.08.2025).
5. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Главные_тенденции_в_защите_информации (дата обращения: 05.08.2025). Информационная безопасность (тренды).
6. URL: <https://press.psu.ru/index.php/philsoc/article/view/9671> (дата обращения: 05.08.2025). Игнатова Е.С. Манипуляция эмоциональной безопасностью кибермошенниками с применением технологий социальной инженерии: case-study // Вестник Пермского университета. Философия. Психология. Социология. 2024. № 3. С. 374-390.
7. URL: <https://gpa.cfuv.ru/attachments/article/4051/Выпуск%2064%20часть%204,%202019%20год.pdf> (дата обращения: 05.08.2025). Братусин А.Р., Власенко Е.Е. О характерных индивидуально-типологических особенностях и поведенческих паттернах личности типичных жертв финансового мошенничества // Проблемы современного педагогического образования. Сборник научных трудов / Ялта: РИО ГПА, 2019. Вып. 64. Ч. 4. С. 292-294.
8. Карпасюк И.В., Карпасюк А.И. Мошенничество в ИБ-сфере и психология жертвы: особенности и взаимосвязи // Защита информации. Инсайд. 2022. № 3(105). С. 41-49. URL: http://www.inside-zi.ru/pages/3_2022/41.html (дата обращения: 05.08.2025).
9. Жмуров Д.В. Личностная и корпоративная кибервиктимность // Виктимология. 2025. Т.12. № 2. С. 202-210. URL: <https://www.victimolog.ru/index.php/victimo/article/view/692> (дата обращения: 05.08.2025).
10. URL: https://psyjournals.ru/journals/psylaw/archive/2023_n1/7 (дата обращения: 05.08.2025). Вихман А.А. Личностные предикторы кибервиктимности и кибербуллинга в юношеском возрасте // Психология и право. 2023. Т. 13. № 1. С. 94–106.
11. <https://cyberleninka.ru/article/n/kiberviktimnost-kak-novaya-kategoriya-viktimologii-postmoderna> (дата обращения: 05.08.2025). Жмуров Д.В. Кибервиктимность как новая категория виктимологии постмодерна // Азиатско-Тихоокеанский регион: экономика, политика, право. 2021. №. 2. С. 113–122.
12. Griffith C., Tetzlaff-Bemiller M., Hunter L. Understanding the cyber-victimization of young people: A test of routine activities theory. Telematics and Informatics Reports. 2023;9. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772503023000026> (дата обращения: 05.08.2025).
13. Aparisi D., Delgado B., Bo R.M. Explanatory model of cyberbullying, cybervictimization, aggressiveness, social anxiety, and adaptation to university: a structural equation analysis // J. Comput. Educ. 2025. Vol 12. Pp. 217-238. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40692-023-00308-5> (дата обращения: 05.08.2025).
14. URL: https://psyjournals.ru/journals/psylaw/archive/2015_n4/Safuanov_Dokuchaeva (дата обращения: 05.08.2025). Сафуанов Ф.С., Докучаева Н.В. Особенности личности жертв противоправных посягательств в Интернете // Психология и право. 2015. Т. 5. № 4. С. 80-93.
15. URL: https://psyjournals.ru/journals/psylaw/archive/2022_n2/Vlasova_Buslaeva (дата обращения: 05.08.2025). Власова Н.В., Буслаева Е.Л. Психологические особенности лиц, склонных к кибервиктимному поведению // Психология и право. 2022. Т. 12. № 2. С. 194-206.

16. Карпасюк И.В., Карпасюк А.И. Математическая модель определения степени склонности к подверженности киберпреступлению // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025. Т.52. №1. С.87-96. URL: <https://vestnik.dgtu.ru/jour/article/view/1702> (дата обращения: 05.08.2025).
17. Истратова О.Н., Эксакусто Т. В. Психодиагностика: коллекция лучших тестов. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. – 375 с.
18. Капустина А.Н. Многофакторная личностная методика Р. Кеттелла. – СПб.: Речь, 2007. – 104 с.
19. Сидоренко Е.В. Методы математической обработки в психологии. – СПб: Речь, 2010. – 350 с.
20. [https://astu.org/Uploads/files/izdatelstvo/Наука%20и%20практика%202023%20%20Техн%20науки\(1\).pdf](https://astu.org/Uploads/files/izdatelstvo/Наука%20и%20практика%202023%20%20Техн%20науки(1).pdf) (дата обращения: 05.08.2025) Карпасюк И.В. Оценка применимости методов математической статистики для определения уровня выраженности черт характера в задаче выявления склонности к кибервиктимности // Наука и практика – 2023. Всероссийская междисциплинарная научная конференция, Астрахань, 13-17 ноября 2023 г. [Электронный ресурс]: материалы / Астрахан. гос. техн. ун-т. –Астрахань: Изд-во АГТУ, 2024. С. 427-429.
21. Карпасюк И.В., Карпасюк А.И., Давидюк Н.В., Чертина Е.В. Формализация процедуры выявления личностных характеристик потенциальной жертвы кибермошенничества // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2024. № 2. С. 77-84. URL: <https://vestnik.astu.org/ru/nauka/article/82549/view> (дата обращения: 05.08.2025).
22. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. – М.: Радио и связь, 1992. – 504 с.
23. Черноруцкий И.Г. Методы оптимизации и принятия решений. – СПб.: Лань, 2001. – 384 с.
24. Тест Кеттелла, 16PF. URL: <https://psytests.org/multi/cat16pfA.html> (дата обращения: 05.08.2025).
25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2024614787 Российская Федерация. Анализатор уровня кибервиктимности: N 2024612910: заявл. 15.02.24; опубл. 28.02.24 / А.И. Карпасюк, Н.В. Давидюк; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный технический университет» ФГБОУ ВО «АГТУ» – 1 с.

References:

1. The State of Crime in Russia in January-August 2024. FSI «MIAC», Ministry of Internal Affairs, Russia. (In Russ) URL: <https://media.mvd.ru/files/application/7206717> (accessed 05.08.2025).
2. Popkova A.A., Parfenov K.V., Alborov A.R. Threats to Information Security in the Russian Public Sector. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Sociology. Economy. Politics.* 2024; 4: 77-93. (In Russ) URL: <http://www.sep-tyuiu.ru/ru/journal-item/80> (accessed 05.08.2025).
3. Nurmammedov A.Ya., Durdyev S.A., Khydyrov M.G. Growing Threats of Cyber Attacks on Critical Infrastructure: Challenges and Innovations. *Herald of Science.* 2024; 5(74): 1485-1487. (In Russ) URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rastuschie-ugrozy-kiberatak-na-kriticheskuyu-infrastrukturu-vyzovy-i-innovatsii> (accessed 05.08.2025).
4. Yangaeva M.O. Social Engineering as a Way of Committing Cyber Crimes. *Vestnik of Siberian Law Institute of the MIA of Russia.* 2021; 1(42): 133-138. (In Russ) URL: <https://sciup.org/socialnaja-inzhenerija-kak-sposob-sovershenija-kiberprestuplenij-140256700> (accessed 05.08.2025).
5. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Главные_тенденции_в_защите_информации (accessed 05.08.2025). Information Security (trends). (In Russ)
6. Ignatova E.S. Manipulation of Emotional Security by Cybercriminals Using Social Engineering Technologies: a Case Study. *Perm University Herald. Philosophy. Psychology. Sociology,* 2024; 3: 374-390. (In Russ) URL: <https://press.psu.ru/index.php/philsoc/article/view/9671> (accessed 05.08.2025).
7. URL:<https://gpa.cfuv.ru/attachments/article/4051/Выпуск%2064%20часть%204,%202019%20год.pdf> (accessed 05.08.2025). Bratusin A.R., Vlasenko E.E. On the Characteristic Individual Typological Features and Behavioral Patterns of the Personality of Typical Victims of Financial Fraud. *Problems of Modern Pedagogical Education.* 2019; 64(4): 292-294. (In Russ)
8. Karpasyuk I.V., Karpasyuk A.I. Information Security Fraud and Victim Psychology: Features and Relationships. *Zashita informacii. Inside.* 2022; 3(105): 41-49. (In Russ.) URL: http://www.inside-zi.ru/pages/3_2022/41.html (accessed 05.08.2025).
9. Zhmurov D. V. Personal and Corporate Cybervictimization. *Victimology.* 2025; 12(2): 202–210. (In Russ) URL: <https://www.victimolog.ru/index.php/victimo/article/view/692> (accessed 05.08.2025).
10. URL: https://psyjournals.ru/journals/psylaw/archive/2023_n1/7 (accessed 05.08.2025). Vikhman A.A. Personality Predictors of Cyber-Victimization and Cyber-Bullying in Adolescence. *Psychology and Law.* 2023; 13(1): 94–106. (In Russ)
11. Zhmurov D. V. Cyber-victimhood as a new category of postmodern victimology. *PACIFIC RIM: Economics, Politics, Law.* 2021; 2: 113–122. (In Russ) URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kiberviktimnost-kak-novaya-kategoriya-viktimologii-postmoderna> (accessed 05.08.2025).

12. Griffith C., Tetzlaff-Bemiller M., Hunter L. Understanding the Cyber-Victimization of Young People: A Test of Routine Activities Theory. *Telematics and Informatics Reports*. 2023; 9. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772503023000026> (accessed 05.08.2025).
13. Aparisi D., Delgado B., Bo R.M. Explanatory Model of Cyberbullying, Cybervictimization, Aggressiveness, Social Anxiety, and Adaptation to University: A Structural Equation Analysis. *J. Comput. Educ.* 2025;12:217-238. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40692-023-00308-5> (accessed 05.08.2025).
14. https://psyjournals.ru/journals/psylaw/archive/2015_n4/Safuanov_Dokuchaeva (accessed 05.08.2025). Safuanov F.S., Dokuchaeva N.V. Personality Characteristics of Victims of Illegal Attacks on the Internet. *Psychology and Law*. 2015; 5(4): 80-93. (In Russ)
15. URL: https://psyjournals.ru/journals/psylaw/archive/2022_n2/Vlasova_Buslaeva (accessed 05.08.2025). Vlasova N.V., Buslaeva E.L. Psychological Features of Individuals Prone to Cyber Victimization. *Psychology and Law*. 2022; 12(2): 194-206. (In Russ)
16. Karpasyuk I.V., Karpasyuk A.I. Mathematical Model for Determining the Degree of Propensity to Be Exposed to Cybercrime. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2025; 52(1): 87-96. (In Russ). URL: <https://vestnik.dgtu.ru/jour/article/view/1702> (accessed 05.08.2025).
17. Istratova O.N., Exacusto T.V. Psychodiagnostics: A Collection of the Best Tests. Rostov-Na-Donu: Phoenix, 2006; 375. (In Russ.)
18. Kapustina A.N. Multifactorial Personality Methodology of R.Cattell. SPb: Language, 2007; 104. (In Russ)
19. Sidorenko E.V. Methods of Mathematical Processing in Psychology. SPb: Language, 2010; 350. (In Russ)
20. [https://astu.org/Uploads/files/izdatelstvo/Найка%20и%20практика%202023%20%20Техн%20науки\(1\).pdf](https://astu.org/Uploads/files/izdatelstvo/Найка%20и%20практика%202023%20%20Техн%20науки(1).pdf) (accessed 05.08.2025). Karpasyuk I.V. Assessing the Applicability of Mathematical Statistics Methods for Determining the Degree of Manifestation of Character Traits in the Task of Identifying Susceptibility to Cybervictimization. / Science and Practice – 2023. All-Russian Interdisciplinary Scientific Conference. Astrakhan, November 13-17. Electronic Materials. Astrakhan State Technical University. Astrakhan: ASTU, 2024; 427-429. (In Russ).
21. Karpasyuk I.V., Karpasyuk A.I., Davidyuk N.V., Chertina E.V. Formalising the Procedure for Identifying the Personality Characteristics of a Potential Cyber Fraud Victim. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2024; 2: 77-84. (In Russ). URL: <https://vestnik.astu.org/ru/nauka/article/82549/view> (accessed 05.08.2025).
22. Shtoyer R. Multicriterial Optimization. M.: Radio and Telecommunications, 1992; 504. (In Russ)
23. Chernorutskiy I.G. Optimization and Decision Making Methods. SPb: Lan, 2001; 384. (In Russ)
24. Cattell Test, 16PF. URL: <https://psytests.org/multi/cat16pfA.html> (accessed 05.08.2025). (In Russ)
25. Certificate of State Registration of Computer Program 2024614787, Russian Federation. Cybervictimization Level Analyzer: Registration No. 2024612910; filed 15.02.2024; publ. 28.02.24 / A.I. Karpasyuk, N.V. Davidyuk; Applicant and Rights Holder: Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Astrakhan State Technical University" FSBEI HE «ASTU». (In Russ)

Сведения об авторах:

Карпасюк Игорь Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, кафедра высшей и прикладной математики; ikarpasyuk@mail.ru

Карпасюк Александр Игоревич, магистрант, кафедра высшей и прикладной математики; akarpasyuk@mail.ru

Information about authors:

Igor V. Karpasyuk, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Higher and Applied Mathematics; ikarpasyuk@mail.ru

Alexander I. Karpasyuk, Master's Student, Department of Higher and Applied Mathematics; akarpasyuk@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 07.09.2025.

Одобрена после рецензирования/Revised 29.10.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 26.12.2025.

Модель оптимальной траектории полёта беспилотного летательного аппарата при фронтальном обследовании промышленных зданий

А.Е. Козлова, О.С. Логунова, М.Ю. Наркевич

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
55000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является построение математической модели для решения задачи оптимизации траектории полёта летательного аппарата для сбора информации о техническом состоянии зданий и сооружений на опасных производственных объектах. Для решения задачи необходимо определить ограничения, влияющие на полёт, и рассмотреть задачу в четырех условиях: идеальные условия полёта; условия полёта при воздействии погодных факторов; условие полёта при наличии физического препятствия в зоне исследования; условие воздействия погодных факторов и наличие физического препятствия в зоне исследования. Введен критерий эффективности. **Метод.** В основе поиска оптимальной траектории полёта применяется модифицированный алгоритм задачи коммивояжера; учитывается время на ускорение, торможение и зависания летательного аппарата. **Результат.** Предложена математическая модель оптимизации траектории полёта беспилотного летательного аппарата при фронтальном обследовании зданий и сооружений с учетом идеальных и неидеальных условий полёта. **Вывод.** Результатом выполненного исследования является формальное представление задачи по построению оптимальной траектории полёта БПЛА.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, оптимальная траектория полёта, задача коммивояжера, неидеальные условия полёта, кластеризация, сеансы полёта

Для цитирования: А.Е. Козлова, О.С. Логунова, М.Ю. Наркевич. Модель оптимальной траектории полёта беспилотного летательного аппарата при фронтальном обследовании промышленных зданий. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026; 53(1):96-107. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-96-107.

The model of the optimal flight path of an unmanned aerial aircraft during a frontal survey of industrial buildings

A.E. Kozlova, O.S. Logunova, M.Yu. Narkevich

Nosov Magnitogorsk State Technical University,
38 Lenin Ave., Magnitogorsk 455000, Russia

Abstract. Objective. The aim of the research is to build a mathematical model for solving the problem of optimizing the flight path of an aircraft to collect information about the technical condition of buildings and structures at hazardous production facilities. To solve this problem, it is necessary to determine the constraints affecting the flight and consider the problem under four conditions: ideal flight conditions; flight conditions under the influence of weather factors; flight conditions in the presence of a physical obstacle in the research area; and the condition of being affected by weather factors and the presence of a physical obstacle in the research area. An efficiency criterion is also introduced. **Method.** A modified traveling salesman problem algorithm is applied as the basis for finding the optimal flight trajectory, and the time for acceleration, deceleration, and hovering of the aircraft is also taken into account. **Result.** A mathematical model for optimizing the flight trajectory of an unmanned aerial vehicle during the frontal inspection of buildings and structures has been proposed, taking into account both ideal and non-ideal flight

conditions. **Conclusion.** The result of the conducted research is a formal representation of the problem of constructing an optimal flight trajectory for an unmanned aircraft.

Keywords: unmanned aircraft, optimal flight trajectory, traveling salesman problem (TSP), non-ideal flight conditions, clustering, flight sessions

For citation: A.E. Kozlova, O.S. Logunova, M.Yu. Narkevich. The model of the optimal flight path of an unmanned aerial aircraft during a frontal survey of industrial buildings. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):96-107. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-96-107.

Введение. В последние годы наблюдается активное внедрение информационно-технологических средств в различные сферы человеческой жизни. Это привело к увеличению использования новейших технических устройств для сбора информации. Наибольшую популярность для достижения данной цели приобретает использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

БПЛА представляет собой летательный аппарат без экипажа на борту, обладающий разной степенью автономности: от управляемых дистанционно до полностью автоматических [1]. Согласно отчету Федерального агентства воздушного транспорта «Росавиация» общий объем использования БПЛА в экономических сферах составляет: видеопроизводство (реклама, средства массовой информации) – 23%, мониторинг и инфраструктура – 20%, сельское хозяйство – 20%, картография и геодезия – 10%, строительство – 10%, логистика – 7%, спасательные операции – 4%, экология – 4%, мобильная связь – 2% [2]. С помощью БПЛА выполняется сбор и регистрация информации в таких сферах, как: сельское хозяйство [3, 4], медицина [5 - 7], спасательные операции [8, 9], охрана объектов [10, 11], строительство [12-14] и др.

Актуальным является исследование о применении БПЛА для решения задач по сбору информации о техническом состоянии опасных производственных объектов. Так, авторами статьи [15] описан модуль визуализации при обследовании зданий опасных производственных объектов с помощью беспилотного летательного аппарата.

В июне 2022 года данный модуль интегрирован в цифровую платформу системы по интеллектуальной поддержке при оценке технического состояния опасных производственных объектов – «ММК БВС-ОПО».

В рамках работы модуля пользователь (пилот) определяет зоны, для которых должна быть проведена фото- или видеосъемка, и по выбранным зонам выстраивается полётная карта БПЛА (рис. 1).



Рис. 1 – Пример построения полётной карты с помощью модуля визуализации в приложении «ММК БВС-ОПО»

Fig. 1 – Example of building a flight map using the visualization module in the "MMK BVS-OPO" application

Несмотря на автоматизацию процесса построения полётной карты, появляется необходимость её оптимизации с учётом временных затрат, технических характеристик летательного аппарата, полезной площади исследуемого объекта и количества точек для фиксирования информации. Таким образом, основная задача данного исследования заключается в описании метода построения оптимальной траектории полёта БПЛА.

Постановка задачи. Задача по построению оптимальной траектории полёта беспилотного летательного аппарата классифицируется как задача оптимизации, поскольку рассматривает требования использования минимальных ресурсов на полет квадрокоптера в заданных условиях и при наличии заданных ограничений.

Особенностями задачи является наличие ограничений, которые определены техническими возможностями БПЛА: скорость движения БПЛА; время автономной работы БПЛА в режиме полёта; время остановки БПЛА в точке фиксирования объекта; предельная высота полёта БПЛА; скорость горизонтального полёта БПЛА; максимальная скорость взлёта БПЛА; максимальная скорость снижения БПЛА; максимальная дальность полёта БПЛА. В проекте рассматривается полет БПЛА в четырех условиях:

- условия идеального полета без учета движения атмосферы и непрерывной области обследования;
- условия неидеального полета с учетом погодного воздействия;
- условия полета при наличии областей недоступных для движения аппарата из-за присутствия физических препятствий;
- условия движения аппарат с учетом движения атмосферы и наличия физических препятствий.

Критерием для поиска оптимальной траектории полёта БПЛА является требование: за минимальное количество времени БПЛА должен облететь максимальное количество точек на фасаде исследуемого объекта. Выдвижение этого требования приводит к получению сопутствующих результатов:

- сокращение количества взлетов и посадок БПЛА в ходе обследования одного фасада;
- сокращение количества разбиений непрерывной площади фасада здания на независимые области обследования;
- минимальные затраты энергии на выполнение обследования одного фасада.

Исходными данными решения задачи оптимизации траектории полёта БПЛА при фронтальном обследовании фасадов промышленных зданий являются:

- эталонные изображения фасадов промышленного здания;
- массив точек на изображении фасада здания, используемых для сбора информации о техническом состоянии поверхности;
- технические характеристики БПЛА, указанные в инструкции пользователя и выступающие в качестве ограничений.

Формализация задачи в идеальных условиях. Результат решения задачи оптимизации траектории полета БПЛА представляется в виде полётной карты с визуализацией и описанием оптимальной траектории полёта и прогнозными условиями полета [16]. На полетной карте необходимо указать отклонение от идеальной траектории в зависимости от случайных порывов ветра, его силы и наличия препятствий.

Формализация задачи по построению траектории полёта БПЛА включает четыре варианта:

- вариант 1: формализация задачи для идеальных условий, которые не рассматривают влияние случайных факторов на траекторию полета;
- вариант 2: уточнение формального представления задачи для неидеальных условий, для которых в качестве случайного воздействия на изменение траектории полета рассматривается направление и сила ветра, а также форма области исследования по полезной площади;
- вариант 3: корректировка траектории полёта летательного аппарата при наличии физических препятствий;
- вариант 4: уточнение формального представления задачи с учётом воздействия на движение летательного аппарата направления и силы ветра, а также наличие физических препятствий в зоне исследования.

Анализ ситуации приводит к представлению траектории движения БПЛА в виде ориентированного взвешенного графа. Дуги графа имеют вес и по смыслу обозначают расстояние от одной точки к другой. Для поиска оптимального пути с обходом всех вершин графа возможно использование модифицированного алгоритма решения задачи коммивояжера. Задача коммивояжера заключается в поиске минимального пути между точками графа среди всех допустимых с обходом всех вершин. Длина пути определяется естественным образом – как сумма расстояний между вершинами графа, входящими в маршрут. Таким образом, получаем ситуацию: в плоскости фигуры, сопоставимой с формой фасада здания, задано n точек с координатами. БПЛА за минимальный промежуток времени должен облететь все выбранные точки с минимальным количеством посадок и взлетов.

Для промежутка времени между взлетом и посадкой БПЛА введем понятие «сеанс полета». В рамках каждого сеанса БПЛА может «посетить» все точки выбранной поверхности или только ее части. Особенностью движения БПЛА является совпадение начальной и конечной точки траектории движения. Учитывая, что представленные ограничения зависят от площади, фасад здания стоит разделить на области независимого исследования. Количество областей является неизвестным и формируется по формуле (1):

$$N_k = T_{\text{вд}} / t_{\text{ак}} + 1, \quad (1)$$

где $T_{\text{вд}}$ – время, которое БПЛА тратит на облёт вдоль объекта исследования, двигаясь с минимальной скоростью; $t_{\text{ак}}$ – время работы аккумулятора.

Схема разбиения площади прямоугольного фасада на области исследования при построении оптимальной траектории полёта БПЛА представлена на рис. 2. Схема, приведенная на рис. 2, является частным случаем. В общем случае поверхности фасада имеет произвольную форму.

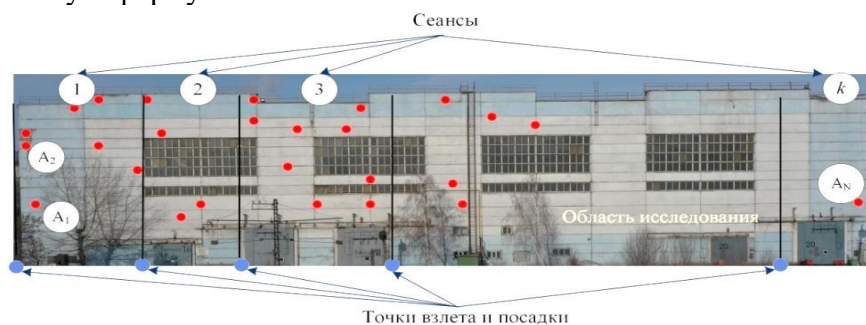


Рис. 2 – Схема разбиения площади прямоугольного фасада на области исследования при построении оптимальной траектории полёта БПЛА

Fig. 2 – Diagram of dividing the area of a rectangular facade into research areas for constructing an optimal UAV flight trajectory

На рис. 2 введены обозначения: $A_1, A_2, \dots, A_N$ – точки исследования, k – номер области исследования. Опираясь на схему разбиения фасада здания, определяются следующие требования к задаче оптимизации:

- количество взлётов и посадок БПЛА должно быть минимальным;
- количество областей исследования должно быть минимальным;
- время на исследование каждой области стремится к минимуму;
- количество используемых электрических аккумуляторов должно быть минимальным.

Определим и формализуем исходные данные задачи:

1) пусть задана произвольная замкнутая область полезной площади исследования D , сопоставимая с формой плоского фасада промышленного здания, и имеющая замкнутую границу L , которая описывается системой уравнений (2):

$$L = L_1|_{[a_0; a_1]} \cup L_2|_{[a_1; a_2]} \cup \dots \cup L_n|_{[a_n; a_0]}, \quad (2)$$

где $L_i|_{[a_{i-1}; a_i]}$ – функция в плоскости фасада, описывающая границу i ; a_0 – абсцисса точки для начала границы L ; n – количество границ, необходимых для описания области;

2) пусть задано неупорядоченное конечное множество A точек для сбора информации, в которых происходит зависание БПЛА на время сбора информации, и принадлежащих области D (3):

$$A = \{A_j(x_j, y_j)\}, \quad (3)$$

где x_j и y_j – координаты заданных точек в выбранной системе координат, связанной с первой точкой взлета; j – номер точки в исходной области D , $j = \overline{1; N}$; N – количество исходных точек.

Схематическое представление исходных данных задачи оптимизации представлено на рис. 3.

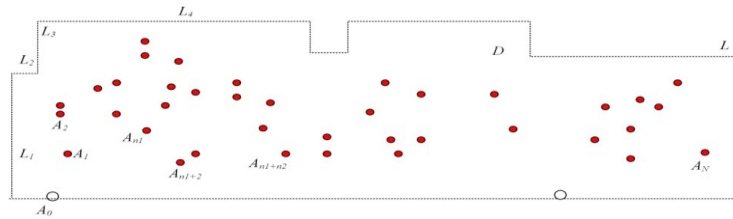


Рис. 3 – Схема задания исходных данных задачи оптимизации траектории полета БПЛА

Fig. 3 – Scheme for setting the initial data of the UAV flight trajectory optimization problem

Для решения задачи требуется: построить кортеж динамических упорядоченных таксонов (кластеров), определяющих порядок обхода (облета) исходных точек (4):

$$B = \|B_k(\|A_{kj}(x_{kj}, y_{kj})\|)\|, \quad (4)$$

где B_k – таксон с порядковым номером k , $k = \overline{1; K}$; k – количество таксонов, определяемое динамически в ходе решения задачи, и заранее является неизвестным; $\|A_{kj}(x_{kj}, y_{kj})\|$ – упорядоченный массив исходных точек, входящих в таксон k .

Построенный кортеж B должен удовлетворять условия:

1) расстояние между любыми двумя точками исходного множества определяется по формуле Евклида и определяют вес ребра графа (5):

$$l_j = \sqrt{(x_j - x_{j-1})^2 + (y_j - y_{j-1})^2}, \quad (5)$$

где l_j – расстояние между точками с номерами j и $j - 1$, $j = \overline{1; N}$;

2) каждое ребро графа, определяемое как прямолинейная траектория движения БПЛА, разделяется на три части: участок равноускоренного разгона, участок равномерного движения и участок равноускоренного торможения (рис. 4), где v_k – скорость равномерного движения БПЛА на участке равномерного движения; v_0 – начальная скорость движения БПЛА, при этом $v_0 = 0$;

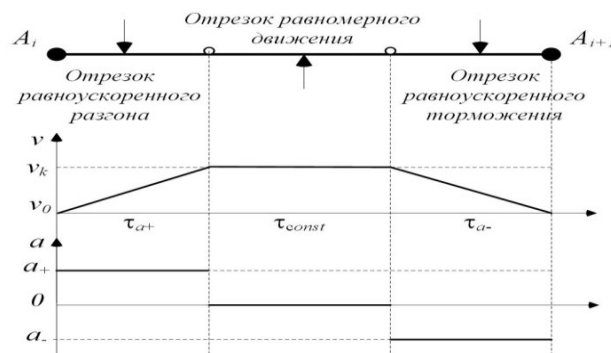


Рис. 4 – Временная структура изменения скорости и ускорения при движении БПЛА между двумя соседними вершинами

Fig. 4 – Temporal structure of velocity and acceleration changes during UAV movement between two adjacent vertices

3) время, затрачиваемое на перелет из точки j в $j + 1$ складывается из четырех частей:

- время, затрачиваемое на ускорение БПЛА – t_{ja+} ;
- время, затрачиваемое на торможение БПЛА – t_{ja-} ;

- время равномерного движения БПЛА – t_{jconst} ;
- время остановки БПЛА в точке фиксирования объекта – t_{js} ;
- 4) итоговое время полета между точками определяется как простая сумма (6):

$$t_j = t_{ja_+} + t_{jconst} + t_{ja_-} + t_{js}. \quad (6)$$

- 5) общее время, затрачиваемое на траекторию внутри кластера (7):

$$T_k = \sum_{j=0}^{n_k} t_{jk}, \quad (7)$$

где t_{jk} – время, затрачиваемое на траекторию между точками j и $j + 1$ внутри кластера k ; n_k – количество точек, вошедших в кластер k ;

- 6) общее время на обследование всего фасада составляет (8):

$$T = \sum_{k=1}^K T_k = \sum_{k=1}^K \sum_{j=0}^{n_k} t_{jk}. \quad (8)$$

При разгоне скорость БПЛА рассчитывается по формуле (9):

$$v_k = 0 + a_+ t_{a_+}, \quad (9)$$

где a_+ – ускорение БПЛА, м/с.

Для того, чтобы рассчитать ускорение БПЛА и время, затраченное на взлёт, необходимо решить систему уравнений. Система уравнений имеет вид (10):

$$\begin{cases} v_k = 0 + a_+ t_{a_+}; \\ \frac{1}{4} l_i = 0 + \frac{a_+ t_{a_+}^2}{2}, \end{cases} \quad (10)$$

где l_i – длина ребра графа между точками с номерами i и $i + 1$.

Решив систему уравнений, получаем формулы для расчета времени и ускорения движения БПЛА (11, 12):

$$t_{a_+} = \frac{l_i}{v_k}, \quad (11)$$

$$a_+ = \frac{v_k}{t_{a_+}} = \frac{l_i}{t_{a_+}^2}. \quad (12)$$

Скорость равномерного движения зависит от характеристик дрона и имеет вид: $v_k = const$.

Аналогичным образом получаем время и ускорение торможения (13, 14):

$$t_{a_-} = \frac{l_i}{v_k}, \quad (13)$$

$$a_- = \frac{v_k}{t_{a_-}} = \frac{l_i}{t_{a_-}^2}. \quad (14)$$

Учитывая введенные обозначения, условия и описание ситуации получили, что множество точек для обследования являются вершинами взвешенного ориентированного графа, для которого требуется построить его динамическое разбиение на упорядоченные таксоны (15):

$$B = \|B_k(\|A_{kj}(x_{kj}, y_{kj})\|)\|, k = \overline{1; K} \text{ и } j = \overline{0; n_k}, \quad (15)$$

и для каждого таксона выполняется критерий (16):

$$T_k = \sum_{j=0}^{n_k} t_{jk} \rightarrow \min, \quad (16)$$

или (17):

$$n_k \rightarrow \max. \quad (17)$$

Для указанных критериев для всего графа формируются критерии: количество упорядоченных таксонов должно быть минимальным (18):

$$K \rightarrow \min. \quad (18)$$

Указанные целевые функции являются взаимосвязанными между собой. Поэтому достаточно найти один из вариантов решения. Открытие нового кластера определяется достижением предельного времени одного сеанса, который зависит от количества точек, включенных в упорядоченную траекторию полета. Эти взаимосвязи определяют особенности методов алгоритмов решения задачи оптимизации: поиска упорядоченных таксонов с максимальным количеством вершин графа (рис. 5).

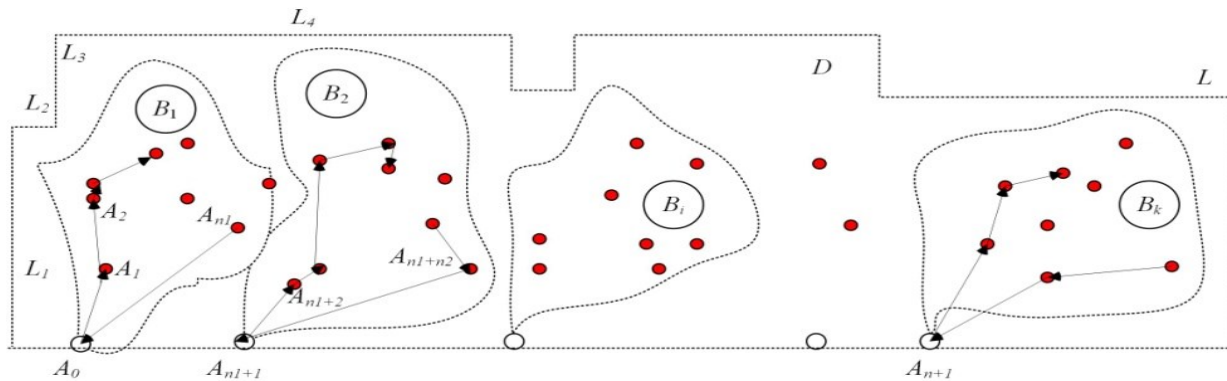


Рис. 5 – Графическая интерпретация искомого решения задачи оптимизации траектории полета БПЛА

Fig. 5 – Graphical interpretation of the sought solution to the UAV flight trajectory optimization problem

На рис. 5 введены обозначения: $L_1, L_2, \dots, L_N$ – замкнутая граница фасада здания, $B_1, B_2, \dots, B_k$ – кортеж динамических упорядоченных таксонов (кластеров), D – область исследования.

Формализация задачи при неидеальных условиях полёта БПЛА. Неидеальными условиями полета БПЛА являются:

- учет возмущающих воздействий при ветреной погоде, тормозящих или ускоряющих движения БПЛА;
- наличие в области исследования фрагментов поверхности, которые являются недоступными для обследования с помощью БПЛА.

При учете возмущающих воздействий при ветреной погоде необходимо учитывать сопротивляемость БПЛА к ветру до определённой его скорости. Так, БПЛА *DJI Mavic PRO* может совершать полёт при максимально допустимой скорости ветра равной 29-38 км/ч. Несмотря на возможность применения БПЛА в ветренную погоду, скорость движения летательного аппарата зависит от скорости ветра и принимает вид (19):

$$\vec{U}_{\text{БПЛА}} = \vec{U}_k + \vec{U}_{\text{ветра}}. \quad (19)$$

Скорость движение БПЛА и движение ветра принимают значения с учетом угла направления. Тем самым проекции скорости БПЛА по оси X и по оси Y принимает вид (20, 21):

$$U_{\text{БПЛА}_X} = U_k \cos \alpha \pm U_{\text{ветра}} \cos \beta, \quad (20)$$

$$U_{\text{БПЛА}_Y} = U_k \sin \alpha \pm U_{\text{ветра}} \sin \beta. \quad (21)$$

Знак определяет направление ветра относительно направлению движения БПЛА.

Также должен быть учтен боковой ветер, при котором БПЛА уходит от направления продольной оси летательного аппарата: влево – при ветре, дующем в левый борт БПЛА, вправо – при ветре, дующем в правый борт.

На рис. 6 показано движение БПЛА в условиях бокового ветра, когда пилот летательного аппарата направил продольную ось БПЛА из точки A в точку B .

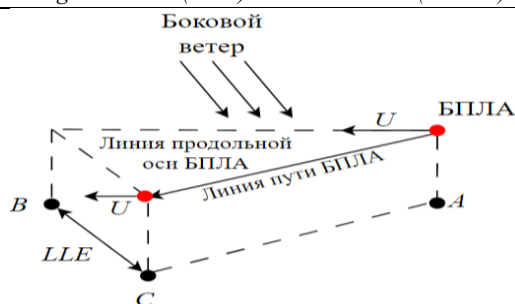


Рис. 6 – Изменение траектории полета БПЛА при боковом ветре
Fig. 6 – Change in the UAV flight trajectory under crosswind conditions

На рис. 6 введены следующие обозначения: A – точка взлета БПЛА; B – заданная точка приземления, C – фактическая точка приземления, U – скорость БПЛА, LLE (*Linear lateral evasion*) – линейное боковое уклонение.

При отсутствии бокового ветра, БПЛА оказался бы над точкой B . БПЛА под действием воздушной скорости перемещается в направлении своей продольной оси, в то время как скорость воздушного течения увлекает его в сторону от этого направления. В результате этого БПЛА совершит движение не по линии своей продольной оси, а по линии фактического пути и окажется над точкой C , уклонившись от линии заданного пути на величину линейного бокового уклонения.

Действительное перемещение БПЛА, участвующего одновременно в двух движениях – вектор воздушной скорости и вектор ветра, направленные под углом друг к другу, происходит по диагонали параллелограмма, построенного на векторах этих движение. Получается навигационный треугольник скоростей (рис. 7).

Сторонами этого треугольника являются векторы воздушной скорости, скорости ветра и путевая скорость. Угол, составленный вектором воздушной скорости и вектором путевой скорости, называется углом сноса DA (*demolition angle*). Если летательный аппарата сносит вправо относительно направления полёта, DA принимает положительное значение, и наоборот.

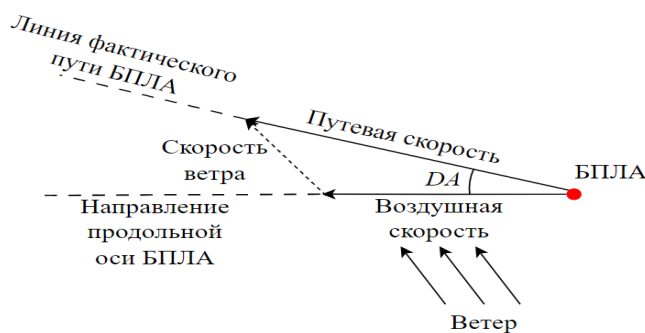


Рис. 7 – Навигационный треугольник скоростей
Fig. 7 – Velocity triangle

Если через основание навигационного треугольника провести меридиану, то получится ряд дополнительных навигационных элементов (рис. 8).

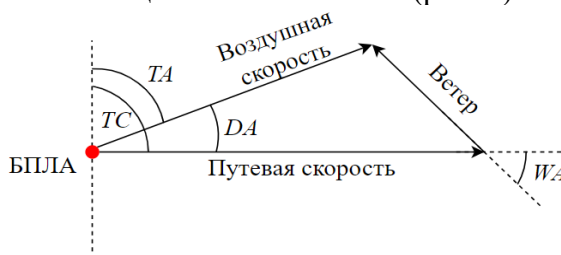


Рис. 8 – Навигационный треугольник скоростей, ориентированный относительно меридианы
Fig. 8 – Velocity triangle oriented relative to the meridian

На рис. 8 введены такие обозначения, как:

– TA (*track angle*) – курс летательного аппарата – это угол, заключенный между северным направлением меридиана, принятого за начало отсчета и продольной осью воздушного судна;

– TC (*true course*) – путевой угол – это угол, заключенный между северным направлением меридиана, принятого за начало отсчета, и линией пути;

– WA (*wind angle*) – угол ветра – угол между линией пути и направлением ветра.

Для вычисления угла сноса и путевой скорости, необходимо вычислить WA (22):

$$WA = NW - TC, \quad (22)$$

где NW (*navigational wind*) – навигационный ветер, который отличается от метеорологического на 180 градусов и на величину магнитного склонения.

С помощью теоремы синусов получаем формулу угла сноса (23):

$$DA = \arcsin\left(\frac{v_{\text{ветра}} \cdot \sin WA}{v_k}\right). \quad (23)$$

Учет направления и силы ветра для исходных данных означает введение поправки на координаты точек в соответствии с навигационным треугольником (рис. 9).

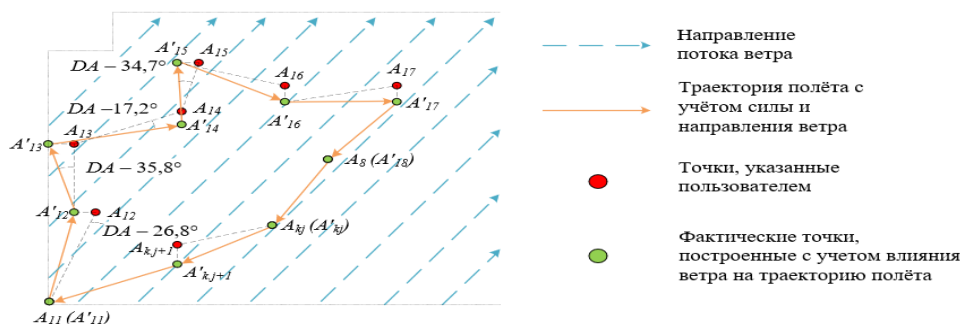


Рис. 9 – Введенные поправки в траектории полёта БПЛА в неблагоприятных условиях в соответствии с расчетом навигационного треугольника и угла сноса

Fig. 9 – Introduced corrections to the UAV flight path in adverse conditions based on the calculation of the velocity triangle and drift angle

На рис. 9 введены обозначения: DA – угол сноса, градусы; $A'_{11}, A'_{12}, \dots, A'_{kj}$ – фактическая точка, построенная с учётом влияния ветра на траекторию полёта летательного аппарата, где k – номер кортежа, j – номер точки в k -ом кортеже.

Кроме того, при построении траектории полёта необходимо учитывать наличие физических препятствий на траектории движения БПЛА, например, кроны деревьев, кустов и другие объекты, которые являются неинформативными для обследования. В данном случае беспилотный летательный аппарат должен обходить препятствия на определенном расстоянии, тем самым, на карте полёта необходимо добавлять вспомогательные точки. При этом БПЛА требуется возвращать в изначальную точку взлёта по кратчайшей траектории полёта с учетом вспомогательных точек (рис. 10 и рис. 11).

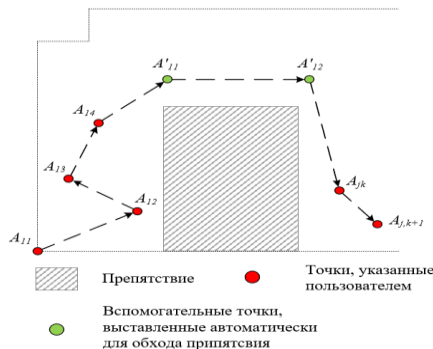


Рис. 10 – Траектория полёта БПЛА с обходом препятствия при учете вспомогательных точек

Fig. 10 – UAV flight path with obstacle avoidance using auxiliary points

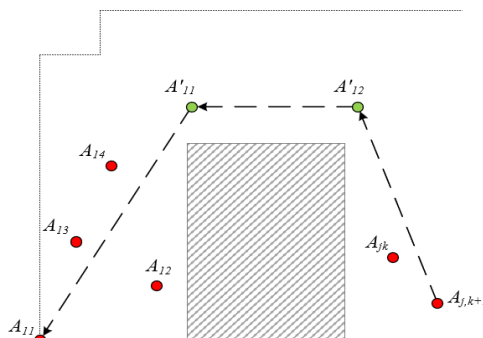


Рис. 11 – Траектория для возвращения БПЛА в точку взлёта

Fig. 11 – Trajectory for the UAV to return to the takeoff point

С учётом дополнительных точек при корректировке траектории полёта летательного аппарата в неблагоприятных погодных условиях и при наличии в зоне исследования препятствий, динамическое разбиение на упорядоченные таксоны принимает вид (24):

$$B = \|B_k(\|A_{kj}(x_{kj}, y_{kj}\|, \|A'_{kj}(x_{kj}, y_{kj}\|)\|, k = \overline{1; K} \text{ и } j = \overline{0; n_k}. \quad (24)$$

Обсуждение результатов. Системы поддержки принятия решений (СППР) представляют собой автоматизированные компьютерные системы, предназначенные для помощи анализе сложных ситуаций и выборе наилучшего решения по множеству критериев. Они применяются в различных сферах, включая бизнес и финансы, энергетику и экологию, логистику и транспорт, а также строительство, где они интегрируются с BIM-технологиями и искусственным интеллектом.

В области мониторинга зданий и сооружений выделяются несколько СППР. SmartBuildings Platform by Johnson Controls использует IoT, машинное обучение и искусственный интеллект (ИИ) для анализа инженерных систем зданий, однако требует высокой стоимости внедрения и качественной IT-инфраструктуры. IBM Maximo for Civil Infrastructure ориентирована на промышленные объекты, применяя IoT-устройства, БПЛА и ИИ для анализа дефектов.

Китайская Baidu AI Construction Monitoring Platform использует ИИ, машинное обучение и компьютерное зрение для выявления дефектов и прогнозирования состояния сооружений, но требует дорогостоящего оборудования и развитой инфраструктуры. Среди российских разработок выделяются СтройКонтроль, СМИС Эксперт и Интеллект-Строй – это системы, адаптированные под отечественные стандарты. Они обеспечивают мониторинг, визуализацию и формирование рекомендаций, однако уступают зарубежным аналогам по точности анализа и глубине применения облачных технологий.

Вышеперечисленные СППР включают в свой функционал возможность сбора графической информации с помощью БПЛА, но не предоставляют инструментов автоматического построения траектории полёта, что ограничивает эффективность обследования зданий и сооружений.

Вывод. 1. Анализ областей применения беспилотных летательных аппаратов показал, что их использование позволяет упростить и автоматизировать круг задач, которые решаются с использованием графической информации и технологий визуализации. Одним из направлений деятельности промышленной безопасности является проведение экспертизы опасных промышленных объектов, при которой производится сбор визуальной информации с применением БПЛА.

2. Опираясь на характеристики БПЛА и ограничения при построении траектории полёта, поставлена задача по построению оптимальной траектории движения летательного аппарата для сбора информации о техническом состоянии опасных производственных объектов. Формализация данной задачи рассматривается в четырех ситуациях: идеальные условия, влияние на полёт летательного аппарата неблагоприятных погодных условий, наличие в зоне исследования препятствия, влияние на БПЛА неблагоприятных погодных условий и наличие препятствий.

3. Для построения траектории полёта БПЛА при неблагоприятных условиях и наличии препятствий вводятся дополнительные точки в исходный массив. Эти «новые» точки включаются в траекторию полета и увеличивают время на обследование. При построении алгоритма движения БПЛА по оптимальной траектории желательным условием является исключение этих точек из выстраиваемых кластеров. Унифицированной будет считаться траектория полета БПЛА, в которой учтены и воздействия ветра, и дополнительные точки, позволяющие получить доступ на всю полезную площадь обследования.

4. Результатом выполненного исследования является формальное представление задачи по построению оптимальной траектории полёта БПЛА для сбора информации о техническом состоянии опасного производственного объекта.

Библиографический список:

1. Василин Н.Я. Беспилотные летательные аппараты. М. : Попурри, 2007, С. 98-105.
2. Состоялось заседание общественного совета при Федеральном агентстве воздушного транспорта с повесткой «Беспилотные авиационные системы. Развитие, управление и регулирование данного вида гражданской авиации» [Электронный ресурс] // Министерство транспорта Российской Федерации. Федеральное агентство воздушного транспорта : [сайт]. [2018]. URL: <https://favt.gov.ru/novosti-novosti/?id=4393> (дата обращения: 15.10.2025).
3. Зубарев Ю.Н., Фомин Д.С., Чашин А.Н., Заболотнова М.В. Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. № 2. 2019. С. 47-51. DOI 10.7242/2658-705X/2019.2.5.
4. Kim J., Kim S., Ju C., Son H. Unmanned Aerial Vehicles in Agriculture: A Review of Perspective of Platform, Control, and Applications // IEEE Access. 2019. С. 1-17. DOI 10.1109/ACCESS.2019.2932119.
5. Рославцева С.А., Жулев А.И. Перспектива применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для целей медицинской дезинсекции // Национальные приоритеты России. № 3 (42). 2021. С. 250-252.
6. Laksham K.B. Unmanned aerial vehicle (drones) in public health: A SWOT analysis // Family Medicine and Primary Care. 2019. pp. 342-346. DOI 10.4103/jfmpc.jfmpc.413.18.
7. Thiels C., Aho J., Zietlow S., Jenkins D. Use of Unmanned Aerial Vehicles for Medical Product Transport // Air Medical Journal. 2014. pp. 104-106. DOI 10.1016/j.amj.2014.10.011.
8. Polka M., Ptak S., Kuziora L. The Use of UAV's for Search and Rescue Operations // Procedia Engineering, 12th international scientific conference of young scientists on sus-tainable, modern and safe transport. № 192. 2017. pp. 748-752. DOI 10.1016/j.proeng.2017.06.129.
9. Abhijith V., Parvathy B., Vismaya Dev G.H., Unnikrishnan R.S., Praveen K.R., Vivek A. Unmanned Aerial Vehicle for Search and Rescue Mission // 4th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI). 2020. pp. 684-687. DOI 10.1109/ICOEI48184.2020.9143062.
10. Жаринов Д.А. О возможности применения беспилотных летательных аппаратов для охраны военных аэродромов // Воздушно-космические силы. Теория и практика. № 5. 2018. С. 54-59.
11. Blistanova M., Blistan P. Support for Protection of the Large Object Using UAVs // Advances in Military Technology. № 11. 2017. pp. 227-237. DOI 10.3849/aimt.01159.
12. Носков И.В., Носков К.И., Тиненская С.В. Дрон-технологии в строительстве – современные решения и возможности // Вестник евразийской науки. № 5. 2020. С. 27.
13. Volkan A., Ulubeyli S., Kazaz A. Unmanned aerial vehicles in the construction industry: applications and implications // 4th International Conference Energy & Engineering Congress. 2019. pp. 490-500.
14. Tatum M.C., Lui J. Unmanned Aircraft System Applications in Construction // Procedia Engineering. Creative Construction Conference. № 196. 2017. pp. 167-175. DOI 10.1016/j.proeng.2017.07.187.
15. Элементы визуализации при обследовании опасных производственных объектов с использованием беспилотного летательного аппарата / Козлова А.Е., Наркевич М.Ю., Логунова О.С., Шахмаева К.Е. // Научная визуализация. 2023. Т. 15. № 2. С. 113-124. DOI 10.26583/sv.15.2.10. EDN NLDVKD.
16. Интеллектуальная система принятия решений при оценке качества зданий и сооружений на опасных производственных объектах: определение траектории движения беспилотного летательного аппарата / Наркевич М.Ю., Логунова О.С., Корниенко В.Д., Калитаев А.Н., Суворцов М.М., Луганская Д.А., Чернышева А.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. № 1, Т. 20. С. 50-60. DOI 10.18503/1995-2732-2022-20-1-50-60.

References:

1. Vasilin, N.Ya. Unmanned Aerial Vehicles. Moscow: Popurri. 2007; 98-105. (In Russ).
2. Meeting of the Public Council at the Federal Air Transport Agency on the agenda "Unmanned Aircraft Systems. Development, Management and Regulation of this Type of Civil Aviation" [Electronic resource]. (2018). Ministry of Transport of the Russian Federation. Federal Air Transport Agency: [website]. Retrieved 15.10.2025. – URL: <https://favt.gov.ru/novosti-novosti/?id=4393>. (In Russ).

3. Zubarev, Yu.N., Fomin, D.S., Chashchin, A.N., & Zabolotnova, M.V. The Use of Unmanned Aerial Vehicles in Agriculture. *Bulletin of the Perm Federal Research Center*, 2019;(2),47-51. DOI 10.7242/2658-705X/2019.2.5. (In Russ)
4. Kim, J., Kim, S., Ju, C., & Son, H. Unmanned Aerial Vehicles in Agriculture: A Review of Perspective of Platform, Control, and Applications. *IEEE Access*, 2019: 7, 1-17. DOI 10.1109/ACCESS.2019.2932119.
5. Roslavtseva, S.A., & Zhulev, A.I. Prospects for the Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Medical Disinsection. *National Priorities of Russia*, 2021;3(42), 250-252. (In Russ).
6. Laksham, K.B. Unmanned aerial vehicle (drones) in public health: A SWOT analysis. *Journal of Family Medicine and Primary Care*, 2019; 8(2), 342-346. DOI 10.4103/jfmpc.jfmpc.413.18.
7. Thiels, C., Aho, J., Zietlow, S., & Jenkins, D. (2015). Use of Unmanned Aerial Vehicles for Medical Product Transport. *Air Medical Journal*, 34(2), 104-108. DOI 10.1016/j.amj.2014.10.011.
8. Polka, M., Ptak, S., & Kuziora, L. (2017). The Use of UAV's for Search and Rescue Operations. *Procedia Engineering*, 192, 748-752. DOI 10.1016/j.proeng.2017.06.129.
9. Abhijith, V., Parvathy, B., Vismaya Dev, G.H., Unnikrishnan, R.S., Praveen, K.R., & Vivek, A. (2020). Unmanned Aerial Vehicle for Search and Rescue Mission. In 2020 4th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI) (pp. 684-687). IEEE. DOI 10.1109/ICOEI48184.2020.9143062.
10. Zharinov, D.A. On the Possibility of Using Unmanned Aerial Vehicles for the Protection of Military Airfields. *Aerospace Forces. Theory and Practice*, 2018;(5), 54-59. (In Russ).
11. Blistanova, M., & Blistan, P. Support for Protection of the Large Object Using UAVs. *Advances in Military Technology*, 2017; 11(2), 227-237. DOI 10.3849/aimt.01159.
12. Noskov, I.V., Noskov, K.I., & Tinenskaya, S.V. (2020). Drone Technologies in Construction – Modern Solutions and Opportunities. *The Bulletin of Eurasian Science*, (5), 27. (In Russ)
13. Volkan, A., Ulubeyli, S., & Kazaz, A. Unmanned aerial vehicles in the construction industry: applications and implications. In 4th International Conference on Energy & Engineering Congress . 2019;. 490-500.
14. Tatum, M.C., & Lui, J. Unmanned Aircraft System Applications in Construction. *Procedia Engineering*, 2017;. 196, 167-175. DOI 10.1016/j.proeng.2017.07.187.
15. Kozlova, A.E., Narkevich, M.Yu., Logunova, O.S., & Shakhmaeva, K.E. Visualization Elements in the Inspection of Hazardous Production Facilities Using Unmanned Aerial Vehicles. *Scientific Visualization*, 2023; 15(2), 113-124. <https://doi.org/10.26583/sv.15.2.10> (In Russ).
16. Narkevich, M.Yu., Logunova, O.S., Kornienko, V.D., Kalitaev, A.N., Surovtsov, M.M., Luganskaya, D.A., & Chernysheva, A.S. An Intelligent Decision-Making System for Assessing the Quality of Buildings and Structures at Hazardous Production Facilities: Determining the Unmanned Aerial Vehicle Flight Path. *Vestnik of Novosibirsk State Technical University*, 2022; 20(1), 50-60. DOI 10.18503/1995-2732-2022-20-1-50-60 (In Russ).

Сведения об авторах:

Козлова Анна Евгеньевна, аспирант кафедры вычислительной техники и программирования; kozlova-ann99@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-3109-2185

Логунова Оксана Сергеевна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительной техники и программирования; logunova66@mail.ru; ORCID: 0000-0002-7006-8639

Наркевич Михаил Юрьевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства; narkevich_mu@mail.ru; ORCID: 0000-0001-6608-8293

Information about authors:

Anna Ev. Kozlova, Postgraduate student, Department of Computer Science and Programming; kozlova-ann99@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-3109-2185

Oksana S. Logunova, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Computer Science and Programming; logunova66@mail.ru; ORCID: 0000-0002-7006-8639

Mikhail Yu. Narkevich, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Department of Industrial and Civil Construction; narkevich_mu@mail.ru; ORCID: 0000-0001-6608-8293

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 03.11.2025.

Одобрена после рецензирования/Reviced 16.12.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 25.01.2026.

Оценка влияния рисков на безопасность систем искусственного интеллекта

И.И. Лившиц

Национальный исследовательский университет ИТМО,
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является оценка влияния рисков на безопасность систем искусственного интеллекта (ИИ). Новая методика учитывает существующую научную и научно-практическую базу в области управления рисками, обеспечения информационной безопасности (ИБ) и стандартов в области ИИ. **Метод.** Представлена методика оценки влияния рисков ИБ на процессы безопасности систем ИИ, основанная на известных и новых аналитических методах исследования безопасности СлПО (стандарты ISO, IEC, ГОСТ). **Результат.** Сформулировано математическое описание исследования, суть которого состоит в оценке рисков ИБ для обеспечения заданного уровня безопасности рассматриваемой системы ИИ как функциональной подсистемы в ограничениях финальной полной системы СлПО (КИИ). Представлены результаты применения предложенного подхода к оценке рисков ИБ для современных и перспективных систем ИИ на базе международных стандартов ISO/IEC. **Вывод.** Перспективы практической реализации предложенной методики связаны с обеспечением объективности, точности и полноты количественной оценки рисков ИБ, что обеспечивает принятие взвешенного и экономически обоснованного решения по обеспечению безопасности систем ИИ. Полученные результаты могут быть применены экспертами при проектировании, оценке соответствия и оптимизации систем ИИ в составе полных систем СлПО (КИИ) в аспекте обеспечения ИБ.

Ключевые слова: искусственный интеллект, система, риск, оценка, аудит, стандарт, информационная безопасность, требования, сложный промышленный объект, критическая информационная инфраструктура

Для цитирования: И.И. Лившиц. Оценка влияния рисков на безопасность систем искусственного интеллекта. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026; 53(1):108-115. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-108-115.

Assessing the impact of risks on the security of Artificial Intelligence systems

I.I. Livshits

National Research University ITMO,
49 Kronverksky Ave., St. Petersburg 197101, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the study is to assess the impact of risks on the security of artificial intelligence (AI) systems. The new methodology takes into account the existing scientific and practical basis in the field of risk management, IT-security and standards in the AI fields. **Method.** This paper presents a methodology for assessing the impact of information security risks on AI system security processes, based on established and new analytical methods for studying software security (ISO, IEC, and GOST standards). **Result.** A mathematical description of the information security risk assessment is formulated to ensure a given level of security for the AI system under consideration as a functional subsystem within the constraints of the final complete software system (CII). The results of applying the proposed approach to assessing information security risks for AI systems based on international ISO/IEC standards are presented. **Conclusion.** The potential for implementing this methodology lies in ensuring the objectivity, accuracy, and completeness of quantitative information security risk assessments, which enables informed decision-making on ensuring the security of AI systems. The results can be applied

by experts in the design, compliance assessment, and optimization of AI systems within critical information infrastructure (CII) systems to ensure information security.

Keywords: artificial intelligence, system, risk, assessment, audit, standard, information security, requirements, complex industrial facilities, critical information infrastructure

For citation: I.I. Livshits. Assessing the impact of risks on the security of Artificial Intelligence systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):108-115. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-108-115.

Введение. В настоящее время все оценки систем ИИ, активно предлагаемые на рынке, выполнены только по собственным методикам разработчиков, не имеют общепринятых и объективных критериев. Существующее положение не позволяет службам, ответственным за безопасное функционирование сложных промышленных объектов (СлПО) получить все необходимые данные для корректной оценки рисков ИБ. Это обстоятельство, в свою очередь, существенно затрудняет создание результативной и эффективной системы защиты различных СлПО, часть которых может относиться к объектам критической инфраструктуры (КИИ).

Оценка рисков ИБ не является тривиальной проблемой даже применительно к хорошо известным техническим системам. Можно отметить несколько методик оценки рисков (ISO 31000, ISO 31010, ISO 27005, NIST и пр.), каждая из которых дает различные наборы практических инструментов, алгоритмов и систем интерпретации результатов. Следует отметить, что даже методики идентификации, обработки и оценивания остаточных рисков существенно различаются. При рассмотрении современных СлПО, тем более с включением модулей ИИ различных разработчиков, данная проблема становится сложнее, поскольку новая программная компонента ИИ сложно формализуется.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения безопасности систем ИИ, разрабатываемых различными компаниями, как компонентов СлПО (КИИ); несовершенством существующих методов оценки рисков ИБ; отсутствием единых универсальных методов оценки соответствия для систем ИИ в составе СлПО (КИИ).

Постановка задачи. В данной публикации автор полагает обоснованным применение более широкого термина СлПО (сложный программный объект), поскольку для относительно простых программных компонентов разработаны и применяются системы верификации с различной степенью доверия, но для компонентов ИИ таких методов верификации пока не представлено. С ростом сложности требований к СлПО в аспекте обеспечения ИБ, применения принципиально новых типов программных компонентов (например, систем мультиагентов на базе ИИ), появления новых типов угроз безопасности информации (УБИ), актуальность разработки и реализации объективной и достоверной системы управления рисками ИБ будет возрастать.

Известно несколько подходов к оценке рисков ИБ в СлПО. В частности, можно отметить подход «Общих критериев» (представленный в стандартах ISO/IEC серии 15408), подход по процессам программной инженерии (представленный в стандартах ISO/IEC серии 12207) и подход систем менеджмента информационной безопасности (представленный в стандартах ISO/IEC серии 27001). Все указанные международные стандарты в РФ приняты в качестве национальных стандартов ГОСТ Р ИСО/МЭК и известны в программной индустрии. Однако для решения современных проблем оценки уровня безопасности для систем ИИ эти стандарты могут быть неэффективны по причине неформализованных компонентов ИИ, появления цепочек «поставщиков», неопределенности предмета рисков для ИИ и, реализации новых типов УБИ (например «галлюцинации» систем ИИ).

Методы исследования. С учетом известных требований к обеспечению безопасности объектов СлПО (КИИ), требуется определить математическое отображение, которое обеспечивает: наблюдение за множеством собственных параметров системы ИИ как объекта оценки; принятие во внимание множество базовых требований ИБ (требований

регуляторов); формирование выходных параметров для обеспечения заданного уровня ИБ через оптимизацию рисков, присущих конкретной реализации системы ИИ.

Для краткого описания данной проблемы целесообразно отметить публикации по тематике оценки влияния технологий ИИ на безопасность промышленных систем автоматизации [1 - 4], важности качественного образования в области ИБ с учетом современных факторов риска [5,6], методике расчета уровня полноты безопасности для сложных промышленных объектов [7- 9] и верификации данных для процессов цифровой трансформации [10].

Среди международных публикаций можно отметить примеры работ в области оценки рисков и влияния ИИ на процессы юриспруденции [11], финансов [12], бизнес-процессов [13], в сфере высшего образования [14] и в области машиностроения [15]. Определенно, можно говорить о всеобъемлющем влиянии современных систем ИИ практически на все отрасли науки, производства, транспорта, образования и пр. Рассмотрим несколько наиболее характерных примеров.

1. Испытание веб-инструментов на основе ИИ, применяемых для аудита смарт-контрактов [16]. Результаты показали, что ни одна из систем не продемонстрировала одновременно высокую точность и полноту выявления уязвимостей. Наилучший показатель точности не превысил 42%. Определено, что системы ИИ лучше справлялись с поверхностными и структурными ошибками (например, нарушениями авторизации или простыми логическими сбоями). Но сценарии, где нужно учитывать сложные взаимосвязи между функциями, оказались особенно проблемными. Эксперты полагают, что высок риск ошибок систем ИИ в тех задачах, где требуются аналитические выводы, а не шаблонное сопоставление паттернов.
2. Тестирования минимального порога «отравления» систем ИИ (GPT-3.5 Turbo и Llama 3.1). Исследование Anthropic [16] показало, что достаточно всего 250 вредоносных документов, чтобы вызвать нарушения работы модели ИИ с 13 миллиардами параметров, т.е. всего 0,00016% от общего объема обучающего корпуса.

Далее рассмотрим несколько доступных ресурсов, содержащих примеры оценки влияния рисков ИБ на безопасность систем ИИ:

1. Ресурс «ATLAS (Adversarial Threat Landscape for Artificial-Intelligence Systems)» [17] представляет обобщенные примеры оценивания некоторых функций для систем ИИ. Для GPT-2 Model Replication известно несколько УБИ, реализуемых злоумышленниками, обладающими достаточными техническими навыками. Допускается, что атакующие могут использовать систему GPT для вредоносных целей до того, как сообщество по безопасности ИИ будет готово к этому.
2. Ресурс NIST представляет документ «NIST AI Risk Management Framework (AI RMF 1.0)» [18], в котором изложены примеры управления рисками в системах ИИ. Данный документ NIST определяет задачи по оценке воздействия ИИ, среди которых – изучение влияния систем ИИ и защищенность от несанкционированного доступа. В приложении «Appendix B» указано, что для систем ИИ следует принять во внимание требования «триады безопасности», в частности доступности и конфиденциальности. Для целей данной публикации важно, что в разделе терминологии рассматриваемый документ NIST примечателен подходом к учету рисков, в частности, в п.1.2.3 (Residual risk) указывается, что «документирование остаточных рисков требует от поставщика системы полного учета рисков, связанных с внедрением продукта ИИ...». В п. 3.2 (Safety) указано, что «подходы к управлению рисками безопасности ИИ должны ... соответствовать существующим отраслевым или прикладным рекомендациям или стандартам».

Таким образом, оценка влияния рисков ИБ на безопасность систем ИИ является актуальной и важной, поскольку затрагивает практически всю совокупность СлПО, в состав которых входят различные компоненты ИИ.

Обсуждение результатов. Рассмотрим характерные примеры реализации рисков ИБ, которые привели к компрометации различных систем ИИ:

- Опубликован факт компрометации многоуровневой системы защиты технологии eSIM [19], причем конкретная система прошла сертификацию по жестким требованиям ISO/IEC 15408 по классу EAL4+. Независимая лаборатория реализовала множество уязвимостей для технологии eSIM, что позволило реализовать риск полного доступа через критические уязвимости в конкретной системе.
- Опубликован факт компрометации специализированных ИИ-детекторов в издательстве Dispatch [20]. Базовый сценарий риска показал, что несколько текстов написаны человеком, однако при тщательном анализе выяснилось, что это все были вымышленные истории. Примечательно, что фальшивки (deep fake) прошли в несколько издательств (Dispatch, Wired и Press Gazette).
- Известный эксперимент Массачусетского Университета (MIT)[21] показал: даже при строгих инструкциях модели продолжают поддерживать искажённое восприятие, вплоть до одобрения самоубийственных идей.
- Пример «полевых» испытаний ИИ-системы распознавания лиц в Лондоне показал, что только 8 из 42 совпадений оказались достоверными [22], однако эта система распознавания все равно внедряется в аэропортах;
- Известны общие противоречия между «комфортными» лабораторными показателями (достигающими 99,95% точности) и реальными данными «полевой» практики. В отчете «Face Analysis Technology Evaluation (FATE)» [23] даются пояснения, что лабораторные тесты без валидации не подходят для оценки работы алгоритмов ИИ в реальной среде (на шумной улице, в условиях плохой освещённости и пр.).

Выполним сопоставление стандартов, применимых для оценки рисков ИБ в системах ИИ. Результаты краткого сопоставления представлены в табл.1

Таблица 1. Сопоставление стандартов для оценки рисков ИБ в системах ИИ
Table 1. Comparison of standards for assessing IT-security risks in AI systems

Международный стандарт	ISO 26000:2010	ISO/IEC TS 5723:2022	ISO/IEC 25010:2011	ISO/IEC 22989:2022	ISO/IEC TR 24368:2022	ISO/IEC 42001:2023	ISO/IEC 42005:2025	ISO/IEC 42006:2025
Наименование	Guidance on social responsibility	Trustworthiness — Vocabulary	Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation — System and software quality models	Information technology — Artificial intelligence — Artificial intelligence concepts and terminology	Information technology — Artificial intelligence — Overview of ethical and societal concerns	Information technology — Artificial intelligence — Management system	Information technology — Artificial intelligence (AI) — AI system impact assessment	Information technology — Artificial intelligence — Requirements for bodies providing audit and certification of artificial intelligence management systems
Национальный стандарт РФ	ГОСТ Р ИСО 26000-2012	н/д	ГОСТ Р 59898-2021	ГОСТ Р 71476-2024	ПНСТ 840-2023	ГОСТ Р ИСО/МЭК 42001-2024	н/д	н/д
Наименование	Руководство по социальной ответственности		Оценка качества систем искусственного интеллекта. Общие положения	Искусственный интеллект. Концепции и терминология искусственного интеллекта	Искусственный интеллект. Обзор этических и общественных аспектов	Искусственный интеллект. Система менеджмента		
Примечание	Формируют образ надежного поставщика, заботящегося о благополучии общества и	Коррелирует с 27000 по «триаде»		Позволяет измерять уровень зрелости в вопросах кибербезопасности и проводить улучшение	Помогает компаниям избежать нарушений морали и права при применении ИИ, предлагая		Предоставляют возможность убедиться в правильности технических решений и снижении	Способствует снижению правовых рисков, предоставляя рекомендации по соблюдению норм и

Международный стандарт	ISO 26000:2010	ISO/IEC TS 5723:2022	ISO/IEC 25010:2011	ISO/IEC 22989:2022	ISO/IEC TR 24368:2022	ISO/IEC 42001:2023	ISO/IEC 42005:2025	ISO/IEC 42006:2025
	соблюдения законов.			системы защиты	критерии оценки этичности принимаемых решений		рисков систем ИИ	обеспечение безопасности
Преимущества	Хорошо сопрягается с ISO/IEC TR 24368:2022 для определения границ безопасности	Хорошо сопрягается со всеми стандартами ISO/IEC	Представляет показатели качества систем ИИ как метрики безопасности	Применимо для валидации данных и сравнения различных моделей ИИ	Применимо для оценивания профессиональной ответственности и понимания различного вреда от систем ИИ	Хорошо сопрягается с сертификационными стандартами ISO/IEC для интегрированных систем менеджмента	Применимо для оценивания ущерба от разумно предзаказанного неправильного использования систем ИИ	Применимо для выполнения аудита систем менеджмента ИИ

Произвольный программный компонент ИИ может быть включен в состав СлПО, который, в свою очередь, может пройти независимую оценку соответствия по различным стандартизованным подходам, указанным выше: ISO/IEC серии 15408, ISO/IEC серии 12207 и ISO/IEC серии 27001.

Представляется целесообразным принять во внимание систему требований на базе стандарта ГОСТ Р МЭК серии 61508 и цели безопасности, применимые для оценки рисков ИБ в системах ИИ, сгруппированные по основным признакам в табл.2

Таблица 2. Определение базовых требований и целей безопасности
Table 2. Defining Basic Safety Requirements and Objectives

Нормативная база Regulatory framework	Пункт Paragraph	Цели безопасности Security goals
ГОСТ Р МЭК 61508-1-2012	Таблица1; п.3	Определение последовательностей событий, приводящих к определенным опасным событиям. Определение рисков, связанных с определенными опасными событиями
	Таблица1; п.13	Подтвердить, что системы, связанные с безопасностью, отвечают спецификации требований к безопасности всей системы в терминах требований к функциям безопасности всей системы
	п.7.6.2.7	Системы управления, связанные с безопасностью, и другие меры по снижению риска должны рассматриваться как независимые: должны основываться на различных технологиях (должно использоваться оборудование различных видов для достижения одних и тех же результатов); не должны иметь общих процедур эксплуатации, технического обслуживания или тестирования.
	п. 7.18.2	Для каждой стадии ЖЦ всей системы безопасности, одновременно с разработкой плана этой стадии должен быть установлен план верификации. В плане верификации должны содержаться критерии, методы и средства, используемые при верификации
ГОСТ Р МЭК 61508-2- 2012	Таблица 1; п. 10.6	Тестировать и оценивать выходные результаты конкретной стадии, чтобы гарантировать их правильность и соответствие требованиям разделов стандартов, предусмотренных для этой стадии. Провести исследование и получить заключение по функциональной безопасности, достигнутой с системы, связанной с безопасностью
	п. 7.3	Планирование подтверждения соответствия безопасности системы: процедуры оценочных испытаний (с обоснованиями); процедуры испытаний и критерии, применяемые для подтверждения соответствия заданным пределам
	п. 7.4.11.2	Канал связи должен быть полностью разработан, реализован и для него проведена процедура подтверждения соответствия (так называемый «белый канал»).
	Таблица В.6	Проведение «Полевых испытаний». Уровень низкой эффективности: 10 тыс. часов эксплуатации; статистическая точность 95 %; отсутствие каких-либо критических отказов безопасности Уровень высокой эффективности: 10 млн. часов эксплуатации; статистическая точность 99,9 %; подробная документация всех изменений
ГОСТ Р МЭК 61508-3-2018	Таблица1, п.10.2	Планирование подтверждения соответствия безопасности системы. Соответствующий план верификации (зависит от стадии): самоконтроль ПО; периодическое тестирование функций безопасности во время выполнения программы; функции ПО для выполнения контрольных испытаний и всех диагностических тестов
	п. 7.4.7	Требования к тестированию ПО: разбиение системы на уровни интеграции; тестовые примеры и тестовые данные; типы выполняемых проверок; условия тестирования,

Нормативная база Regulatory framework	Пункт Paragraph	Цели безопасности Security goals
		включая инструменты, программы поддержки и описание конфигурации; условия, при которых проверка считается выполненной.
ГОСТ Р МЭК 61508-4-2012	п. 3.8.1	Верификация (verification)
	п. 3.8.2	Подтверждение соответствия (validation)
	п. 3.8.6	Охват диагностикой (diagnostic coverage)
ГОСТ Р МЭК 61508-5-2012	Таблица Е.2	Пример калибровки графа рисков общего назначения. Методы графа риска могут оказаться не лучшим решением задачи, если объект работает в непрерывном режиме.
ГОСТ Р МЭК 61508-6-2007	Таблица В.1	Параметры и диапазоны их значений (применяется к разным архитектурам), Диагностическое покрытие (DC) 0; 60; 90; 99
	Таблица В.2	Средняя вероятность отказа по запросу в течение 6 мес. интервала между контрольными проверками при среднем времени ремонта 8 ч
	Таблица В.9	Неидеальные контрольные испытания
	Таблица С.2	Уровни и диапазоны диагностического охвата различных компонентов (40 % - 60 %, Низкий диагностический охват). В настоящее время для подсистем, схемы высокого диагностического охвата которых отсутствуют, средства и методы высокой достоверности диагностики неизвестны
	Таблица Е.18	Строго рекомендуемые методы верификации ПО: Анализ влияния Повторная верификация измененных программных модулей Повторная верификация программных модулей, на которые оказывают влияние изменения в других модулях Повторная верификация системы в целом Управление конфигурацией программного обеспечения
ГОСТ Р МЭК 61508-7-2007	А.9.3	Логический контроль последовательности выполнения программ. Обеспечивается правильная последовательность выполнения отдельных частей программы с помощью встроенных (процедур учета, ключевых процедур) или внешних средств контроля.
	В.1.3	Предотвращение влияния систем, связанных с безопасностью, на системы, не связанные с безопасностью, в непредвиденных ситуациях.
	В.2.2	Формальные методы являются математическими моделями функции и/или структуры системы и обеспечивают однозначное описание системы.
	В.2.5	Таблицы контрольных проверок применяют на всех этапах полного ЖЦ безопасности ПО для оценки функциональной безопасности. Использование таблицы контрольных проверок зависит от экспертной оценки и суждения специалиста, который выбирает и применяет таблицу контрольных проверок. Принятые им решения относительно выбранных(ой) таблиц(ы) контрольных проверок должны быть документально оформлены и обоснованы. Если таблицы контрольных проверок пересматриваются, то гарантируется получение одних и тех же результатов, если только не используются различные критерии. Для документирования результатов каждого вопроса должен использоваться ответ «успешно», «неуспешно» или «не завершено», либо аналогичный набор ответов.

С учетом постановки задачи и всех аналитических материалов, сформируем математическое отображение:

$$R = [(X); (I); (R); (N); (G); (O)]$$

где: (X) – множество параметров безопасности системы безопасности (система ИИ);
(I) – исходное множество параметров объекта оценки (система ИИ);
(R) – множество рисков, присущих системе безопасности;
(N) – множество базовых требований ИБ (стандарты, методики);
(G) – множество требований регуляторов (органов по оценке соответствия);
(O) – множество выходных параметров для обеспечения уровня ИБ.

Представленное математическое отображение обеспечивает:

1. Устойчивое наблюдение за множеством собственных параметров системы ИИ как объекта оценки (например, по базе ISO/IEC 15408 «Общие критерии»), что позволяет оптимально описать все требования к объекту оценки (политики безопасности, границы безопасности, функции безопасности и пр.);
2. Принятие во внимание совокупность входных параметров (базовый «движок», например GigaChat, Chat GPT, DeepSeek, и пр.);
3. Учет множества базовых требований ИБ (например, on-prem сервера или возможность «частного» корпоративного облака и пр.);

4. Учет требований регуляторов (ФСТЭК, Центральный банк, ФСБ и пр.);
5. Формирование выходных параметров для обеспечения заданного уровня ИБ через оптимизацию рисков, присущих конкретной реализации системы ИБ (например, количественная модель по базе ISO/IEC серии 27005 или 31000);
6. Формирование объективных и прослеживаемых требований для верификации и валидации систем ИИ (например, по базе ISO/IEC серии 61508);
7. Возможность независимой оценки соответствия систем ИИ по международным признанным стандартам (например, по базе ISO/IEC серии 42001, 42005 и 42006).

Вывод. Для обеспечения безопасности системы ИИ необходимо идентифицировать, оценивать и управлять рисками ИБ (в частности – доступности и качества всех данных, которые обрабатываются в конкретной системе ИИ).

Представлен подход к оценке рисков ИБ для систем ИИ, основанный на методах объективной оценки безопасности СлПО с учетом совокупности параметров (объекта оценки, требований ИБ, требований регуляторов и пр.).

Представленный подход также позволяет объективно оценить и другие риски ИБ (например, соблюдение политик безопасности в отношении чувствительных данных в конкретной системе ИИ).

Библиографический список:

1. Бурланков С.П., Семёнов К.О., Галактионова Е.В., Комаров В.А. Управление рисками как элемент экономической безопасности в компаниях, работающих в сфере цифровых технологий // Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова. 2024. Т.21. № 6 (138). С. 123-130.
2. Демба С. Роль искусственного интеллекта в современной банковской системе // Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова. 2024. Т. 21. № 3 (135). С. 164-172.
3. Сушкова И.А., Мамаева Л.Н. Искусственный интеллект в экономике и системе экономической безопасности // Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова. 2023. Т. 20. № 4 (130). С. 44-53.
4. Лившиц И.И. Влияние современных технологий искусственного интеллекта на безопасность промышленных систем автоматизации // Автоматизация в промышленности. 2025. № 6. С. 34-37.
5. Лившиц И.И. Оценка необходимости совершенствования действующего порядка подготовки квалифицированных кадров в области информационной безопасности // Газовая промышленность. 2024. № 9 (871). С. 200-205
6. Лившиц И.И. Анализ процесса подготовки специалистов в области информационной безопасности // Автоматизация в промышленности. 2023. № 9. С. 56-60.
7. Конаков А.М., Лившиц И.И. Поиск оптимального пути построения системы защиты информации на основе марковских цепей // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024. Т. 51. № 3. С. 86-92.
8. Лившиц И.И., Сунцова Д.И. Методика расчета уровня полноты безопасности для сложных промышленных объектов топливно-энергетического комплекса // Энергобезопасность и энергосбережение. 2024. № 1. С. 5-12.
9. Лившиц И.И., Понаморева К.А. Формирование требований к методике оценки рисков для компонентов АСУТП // Энергобезопасность и энергосбережение. 2024. № 2. С. 5-13.
10. Лившиц И.И. Верификация данных для процессов цифровой трансформации // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2024. № 6 (81). С. 240-245.
11. Fine A., Le S., Miller M.K. Content analysis of judges' sentiments toward artificial intelligence risk assessment tools. *Criminology, Criminal Justice, Law and Society*. 2023. Т. 24. № 2. С. 31-46.
12. Tao C., Liu Y. Application and development of artificial intelligence risk control in internet finance. *Frontiers in Business, Economics and Management*. 2024. Т. 14. № 2. С. 10-12.
13. Muria-Tarazón Ju.C., Oltra-Gutiérrez Ju.V., Oltra-Badenes R., Escobar-Román S. Uncovering research trends on artificial intelligence risk assessment in businesses: a state-of-the-art perspective using bibliometric analysis. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2025. Т. 15. № 3. С. 1412.
14. Schaeffer D., Coombs L., Luckett J., Marin M., Olson P. Risks of AI applications used in higher education. *Electronic Journal of e-Learning*. 2024. Т. 22. № 6. С. 60-65.
15. Shin H.S., Choi Su.B., Kim J.W. Harnessing highly efficient triboelectric sensors and machine learning for self-powered intelligent security applications. *Materials Today Advances*. 2023. Т. 20. С. 100426.
16. <https://www.securitylab.ru/news/564486.php>
17. <https://atlas.mitre.org/>
18. <https://www.nist.gov/itl/ai-risk-management-framework>
19. <https://www.securitylab.ru/news/561256.php>

20. https://www.cnews.ru/news/top/2025-08-25_wired_i_business_insider_popalis_na
21. <https://arxiv.org/abs/2504.18412>
22. <https://www.securitylab.ru/news/562549.php>
23. https://pages.nist.gov/frvt/reports/morph/fate_morph_4B_NISTIR_8584.pdf

References:

1. Burlankov S.P., Semenov K.O., Galaktionova E.V., Komarov V.A. Risk management as an element of economic security in companies operating in the field of digital technologies. *Bulletin of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2024;21(6)(138):123-130. (In Russ)
2. Demba S. The role of artificial intelligence in the modern banking system. *Bulletin of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2024; 21(3)(135):164-172. (In Russ)
3. Sushkova I.A., Mamaeva L.N. Artificial intelligence in the economy and the system of economic security. *Bulletin of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2023; 20(4)(130):44-53. (In Russ)
4. Livshits I.I. The Impact of Modern Artificial Intelligence Technologies on the Security of Industrial Automation Systems. *Automation in Industry*. 2025;6:34-37. (In Russ)
5. Livshits I.I. Assessment of the Need to Improve the Current Procedure for Training Qualified Personnel in the Field of Information Security. *Gas Industry*. 2024;9(871): 200-205. (In Russ)
6. Livshits I.I. Analysis of the Process of Training Specialists in the Field of Information Security. *Automation in Industry*. 2023; 9:56-60. (In Russ)
7. Konakov A.M., Livshits I.I. Search for an Optimal Way to Construct an Information Security System Based on Markov Chains. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2024;51(3): 86-92. (In Russ)
8. Livshits I.I., Suntsova D.I. Methodology for Calculating the Safety Integrity Level for Complex Industrial Facilities in the Fuel and Energy Complex. *Energy Safety and Energy Saving*. 2024;1:5-12. (In Russ)
9. Livshits I.I., Ponomoreva K.A. Formation of Requirements for the Risk Assessment Methodology for APCS Components. *Energy Safety and Energy Saving*. 2024;2:5-13. (In Russ)
10. Livshits I.I. Data Verification for Digital Transformation Processes. *Information and Economic Aspects of Standardization and Technical Regulation*. 2024;6(81):240-245. (In Russ)
11. Fine A., Le S., Miller M.K. Content analysis of judges' sentiments toward artificial intelligence risk assessment tools. *Criminology, Criminal Justice, Law and Society*. 2023;24(2):31-46.
12. Tao C., Liu Y. Application and development of artificial intelligence risk control in internet finance. *Frontiers in Business, Economics and Management*. 2024;14(2):10-12.
13. Muria-Tarazón Ju.C., Oltra-Gutiérrez Ju.V., Oltra-Badenes R., Escobar-Román S. Uncovering research trends on artificial intelligence risk assessment in businesses: a state-of-the-art perspective using bibliometric analysis. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2025;15(3):1412.
14. Schaeffer D., Coombs L., Luckett J., Marin M., Olson P. Risks of AI applications used in higher education. *Electronic Journal of e-Learning*. 2024; 22(6):60-65.
15. Shin H.S., Choi Su.B., Kim J.W. Harnessing highly efficient triboelectric sensors and machine learning for self-powered intelligent security applications. *Materials Today Advances*. 2023;20:100426.
16. <https://www.securitylab.ru/news/564486.php>
17. <https://atlas.mitre.org/>
18. <https://www.nist.gov/itl/ai-risk-management-framework>
19. <https://www.securitylab.ru/news/561256.php>
20. https://www.cnews.ru/news/top/2025-08-25_wired_i_business_insider_popalis_na
21. <https://arxiv.org/abs/2504.18412>
22. <https://www.securitylab.ru/news/562549.php>
23. https://pages.nist.gov/frvt/reports/morph/fate_morph_4B_NISTIR_8584.pdf

Сведения об авторе:

Лившиц Илья Иосифович, доктор технических наук, профессор практики, Livshitz.i@yandex.ru

Information about author:

Ilya I. Livshits, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of Practice; Livshitz.i@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов/The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 16.10.2025.

Одобрена после рецензирования/Revised 30.11.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 17.01.2026.

Определение зависимостей API специализированного программного обеспечения при максимально возможной нагрузке без существенной деградации системы

Л.И. Литвиненко, Л.А. Коробова, И.С. Толстова

Воронежский государственный университет инженерных технологий,
394036, г. Воронеж, проспект Революции, д. 19, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является определение зависимости API специализированного программного обеспечения при максимально возможной нагрузке без существенной деградации системы. **Метод.** Исследование основано на методах регрессионного анализа. Рассматриваются ограничения по объёму оперативной памяти (RAM) и количеству процессорных ядер (CPU), что позволяет исследовать поведение и выявлять узкие места СПО в виртуализированных окружениях с ограниченными ресурсами. **Результат.** Для анализа зависимостей ожидаемых пар параметров предлагается использование моделей - линейной, экспоненциальной, логарифмической и полиномиальной (до 4-й степени). Выбор наилучшей модели предлагается по критерию скорректированного коэффициента детерминации с опциональной фильтрацией выбросов методом межквартильного размаха (IQR) и проверкой статистической значимости уравнения регрессии. Дополнительно рассчитывается выборочная остаточная дисперсия для оценки качества подгонки модели. **Вывод.** Методика представляет системный подход к анализу зависимостей производительности API специализированного программного обеспечения, основанный на принципах прикладной статистики и инженерной интерпретации. Методика может быть использована для принятия обоснованных инфраструктурных решений, а также для рационального сокращения объёма нагрузочного тестирования; позволяет транслировать статистические паттерны в конкретные инженерные действия: оптимизацию инфраструктуры, рефакторинг кода, настройку масштабирования.

Ключевые слова: специализированный софт, нагрузочное тестирование, регрессионные модели, коэффициент детерминации, скорректированный коэффициент детерминации; линейная, экспоненциальная, логарифмическая, полиномиальная регрессии; диагностика моделей, парный регрессионный анализ

Для цитирования: Л.И. Литвиненко, Л.А. Коробова, И.С. Толстова. Определение зависимостей API специализированного программного обеспечения при максимально возможной нагрузке без существенной деградации системы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(1):116-122. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-116-122.

Determination of specialized software API dependencies under maximum possible load without significant system degradation

L.I. Litvinenko, L.A. Korobova, I.S. Tolstova

Voronezh State University of Engineering Technologies,
19 Revolution Ave., Voronezh 394036, Russia

Abstract. Objective. The article considers the topic of determining the dependencies of the API of specialized software under the maximum possible load without significant system degradation. **Method.** The study is based on regression analysis methods. As part of the research, limitations on the amount of random access memory and the number of processor cores are considered, which allows us to study the behavior and identify bottlenecks of SSS in virtualized environments with limited resources. **Result.** To analyze the dependencies of expected pairs of parameters, it is

proposed to use the following models: linear, exponential, logarithmic and polynomial (up to 4th degree). The best model is selected based on the adjusted coefficient of determination, with optional outlier filtering using the interquartile range method and a test of the statistical significance of the regression equation. Additionally, sample variance is calculated to assess the quality of the model fit. **Conclusion.** This methodology presents a systematic approach to analyzing API performance dependencies in specialized software, based on the principles of applied statistics and engineering interpretation. It can be used to make informed decisions about reducing the scope of load testing. The methodology enables the translation of statistical patterns into engineering actions: infrastructure optimization, code refactoring, and scaling.

Keywords: specialized software, load testing, regression models, coefficient of determination, adjusted coefficient of determination; linear, exponential, logarithmic, and polynomial regression; model diagnostics, paired regression analysis

For citation: L.I. Litvinenko, L.A. Korobova, I.S. Tolstova. Determination of specialized software API dependencies under maximum possible load without significant system degradation. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):116-122. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-116-122.

Введение. Определение зависимостей API специализированного программного обеспечения (СПО) при максимально возможной нагрузке без существенной деградации системы является важной задачей, поскольку позволяет выявить, какие входные параметры системы (ресурсы и метрики производительности) влияют на ключевые показатели работы системы под нагрузкой, а также прогнозировать поведение системы при росте нагрузки, что способствует принятию обоснованных инфраструктурных решений.

Постановка задачи. В математической статистике регрессионный анализ является ключевым инструментом в задачах моделирования зависимостей между переменными [1]. Выбор наилучшей модели - линейной, полиномиальной, экспоненциальной или логарифмической, остаётся сложной задачей, особенно при отсутствии априорных предположений о форме зависимости. Выбор модели основывается на коэффициенте детерминации R^2 , однако этот показатель склонен к завышению при увеличении числа параметров (например, степени полинома), что может привести к переобучению. Информационные критерии, такие как AIC (критерий Акаике), вводят штраф за количество параметров, что способствует выбору более простых и интерпретируемых моделей. Однако, они основаны на асимптотических приближениях и не всегда гарантируют наилучшую обобщающую способность на новых данных. Кросс-валидация (CV) позволяет напрямую оценить устойчивость модели к переобучению и её предсказательную способность, но требует значительных вычислительных ресурсов, особенно при большом числе моделей [2].

Цель исследования состоит в разработке методики определения зависимостей API СПО при максимально возможной нагрузке без существенной деградации системы с использованием методов регрессионного анализа с последующей интерпретацией физического смысла зависимости в контексте архитектуры и поведения системы.

Методы исследования. Методика включает следующие этапы.

Этап 1. Сбор данных. Требуется провести нагрузочное тестирование приложения в ограниченной среде (контейнер, виртуальная машина) с различными комбинациями выделенных ресурсов (количество ядер CPU и объем RAM). Определяется максимально возможная нагрузка в текущей конфигурации за заданный период времени. Критерии деградации выбрать опционально - это может быть как процент ошибок, так и время отклика (*latency*), превышающее заранее установленный порог, или комбинация нескольких метрик, таких как задержка, ошибка (*rate*) и пропускная способность (*throughput*). Для обеспечения воспроизводимости тестов необходимо стандартизировать тестовые сценарии и исключить внешние факторы, влияющие на результаты (сетевые задержки, фоновые процессы) [3].

Этап 2. Полученные результаты на этапе 1 переносятся в файл формата csv для дальнейшего использования в рамках регрессионного анализа [4] на этапе 3.

Этап 3. Для регрессионного анализа данных предлагается разработать, реализовать и далее использовать приложения [5], в основу которого положен пошаговый алгоритм:

Шаг 1. Загрузка и парсинг CSV-файла с данными. После выбора пользователем предполагаемой пары X - Y выполняется парсинг данных *cpuCores*, *ramCores*, *qSuccess*, *tAvg*, *tps*, *uCpu*, *uRam*, полученных на шаге 1 и 2, с добавлением проверок на корректность формата и игнорирование строк с ошибками [6]. Возможные типы переменных указаны в табл. 1.

Таблица 1. Парсинг CSV файла с результатами

Table 1. Parsing the CSV file with results

Переменная Variable	Возможный тип в реализации Possible type in implementation	Описание Description
cpuCores	Int	Количество выделенных ядер CPU
ramCores	Double	Объём оперативной памяти, обусловлено, что часть
qSuccess	Double	Доля успешных запросов (<i>QoS</i> — <i>Quality of Service</i>)
tAvg	Double	Среднее время обработки одного запроса (<i>latency</i>)
Tps	Double	Пропускная способность: транзакций в секунду (<i>Throughput</i>)
uCpu	Double	Утилизация CPU (%)
uRam	Double	Утилизация RAM (%)

Шаг 2. Выполнить регрессионное моделирование. Если на предыдущих шагах была выбрана фильтрация выбросов, то выполняется фильтрация выбросов по межквартальному размаху (IQR) для X и Y одновременно, что исключает аномальные точки, вызванные сетевыми задержками или ошибками измерения [7, 8].

Шаг 3. Провести оценку модели, ранее созданной по каждой комбинации (табл. 2).

Таблица 2. Предлагаемые комбинации параметров для регрессионного моделирования

Table 2. Suggested parameter combinations for regression modeling

X	Y	Обоснование выбора комбинации /Justification for the choice of combination
cpuCores	Tps	Количество CPU-ядер напрямую влияет на параллельную обработку запросов. Увеличение ядер позволяет системе обрабатывать больше операций в единицу времени (TPS). Зависимость позволяет оценить масштабируемость системы по CPU и определить точку насыщения, после которой добавление ядер не даёт прироста производительности.
ramCores	tAvg	Объём выделенной RAM влияет на производительность, особенно если приложение интенсивно использует память (кеширование, обработка больших объектов). Недостаток памяти приводит к свопингу, GC-паузам, промахам кэша, что увеличивает среднее время ответа (tAvg). Эта комбинация помогает выявить оптимальное соотношение RAM/CPU.
tps	tAvg	С ростом нагрузки (TPS) система приближается к пределу своей пропускной способности. В соответствии с законом Литтла и теорией массового обслуживания, при увеличении входного потока время ожидания в очереди растёт, что приводит к увеличению tAvg. Эта зависимость критична для определения предела устойчивой работы системы и точки деградации (например, когда tAvg резко возрастает).
uCpu	tAvg	Загрузка CPU (uCpu) - индикатор интенсивности использования процессора. При высокой загрузке (>80–90%) система начинает тратить время на переключение контекстов, обработку прерываний, что замедляет обработку запросов. Связь помогает определить порог CPU-насыщения, при котором начинается деградация времени отклика.
Tps	qSuccess	С ростом нагрузки (TPS) система может не успевать обрабатывать запросы, что приводит к таймаутам, отказам бэкендов, переполнению очередей. Это снижает долю успешных запросов (qSuccess). Эта зависимость позволяет оценить надёжность системы под нагрузкой и определить максимальный безопасный уровень нагрузки без потери качества сервиса.
uCpu	qSuccess	Высокая загрузка CPU может привести к нехватке ресурсов для обработки запросов, особенно если приложение чувствительно к задержкам. Это может вызывать таймауты на уровне приложения или прокси, что снижает qSuccess. Связь помогает понять, насколько стабильность системы зависит от CPU-ограничений и выявить «узкие места» в коде (например, CPU-интенсивные алгоритмы).

В табл. 2 описан пример выбора комбинаций параметров X и Y для регрессионного моделирования для оценки производительности API СПО под нагрузкой [7, 8]. Предлагается реализация с возможностью выбора пользователем переменных X и Y , после выбора пользователем значений переменных, инициировать обучение нескольких моделей регрессии: линейной, полиномиальной разных степеней от 1 до 4, экспоненциальной и логарифмической.

Шаг 4. Провести диагностику и выбор лучшей модели [3, 9]. Алгоритм на данном шаге включает в себя следующие пункты:

1. Рассчитать коэффициент детерминации R^2 .

$$R^2 = 1 - \frac{e' \cdot e}{y' \cdot y},$$

где $e' \cdot e$ – скалярное произведение вектора остатков на себя, значение равно сумме квадратов остатков; $y' \cdot y$ – скалярное произведение вектора y на себя, значение равно сумме квадратов наблюдаемых значений.

2. Произвести фильтрацию на основании критерия значимости уравнения регрессии [5, 6, 9].

$$F = \frac{R^2 \cdot (n - p - 1)}{(1 - R^2) \cdot p} > F(\alpha, k_1, k_2)$$

где R^2 – коэффициент детерминации; n – количество наблюдений в выборке; p – количество независимых переменных (предикатов) в модели; $F(\alpha, k_1, k_2)$ – значение F -критерия Фишера-Снедекора, где α – степень значимости критерия; $k_1 = p$, $k_2 = n - p - 1$.

3. Произвести выбор лучшей модели. Среди значимых моделей необходимо выбрать ту, у которой скорректированный коэффициент детерминации имеет максимальное значение. При равенстве – предпочтение модели с меньшим числом параметров. Затем выполнить расчёт скорректированного коэффициента детерминации $\hat{R}^2$ [5, 6, 9].

$$\hat{R}^2 = 1 - \frac{n - 1}{n - p - 1} \cdot (1 - R^2)$$

4. Выполнить расчет выборочной остаточной дисперсии. Полученные результаты поместить в таблицу (рис. 1). Выборочная остаточная дисперсия [7, 9]:

$$s^2 = \frac{e' \cdot e}{n - p - 1} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n - p - 1}.$$

где e – вектор остатков; i – текущий номер наблюдения зависимой переменной.

Вектор остатков – разница между наблюдаемыми значениями зависимой переменной и значениями, предсказанными моделью. На рис. 1 представлен пример возможной реализации табличной части приложения.

Регрессионный анализ параметров нагрузки

Результаты моделей

X: TPS Y: QSuccess ☒ Фильтровать выбросы (IQR по X и Y) Анализ парной регрессии

Модель	Коэффициент детерминации	Скорректированный коэффициент детерминации	Несмещенная оценка дисперсии остатков	Уравнение значимо (F)
Полиномиальная (d=4)	0,9986	0,9983	129110,278486	Да
Полиномиальная (d=3)	0,9963	0,9959	320206,131248	Да
Полиномиальная (d=2)	0,9888	0,9880	933435,312882	Да
Полиномиальная (d=1)	0,9477	0,9459	4195959,588554	Да
Линейная	0,9477	0,9459	4195959,588554	Да
Логарифмическая	0,8910	0,8871	8747012,627462	Да
Экспоненциальная	0,7820	0,7742	17495960,971229	Да

Рис. 1 – Пример реализации табличной части приложения (значения в табличной части рассчитаны на синтетических данных, специально созданных для целей отладки)

Fig. 1 – Example of the application's table section implementation (The values in the table section are calculated using synthetic data specifically created for debugging purposes)

На рис. 2 представлен пример возможной реализации графической части приложения.

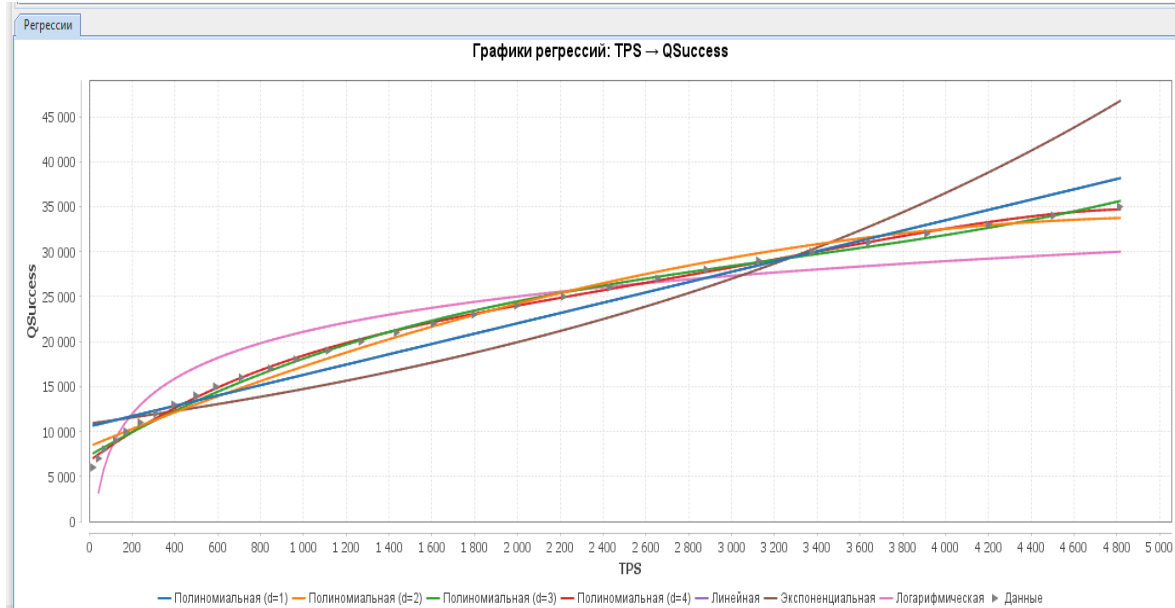


Рис. 2 – Пример реализации графической части приложения (графики построены на синтетических данных, специально созданных для целей отладки)

Fig. 2 – An example of the implementation of the graphical part of the application (graphs are built on synthetic data, specially created for debugging purposes)

Этап 4. Анализ результатов, полученных на предыдущих этапах.

Выбор наилучшей формы регрессионной зависимости позволяет отразить физические закономерности поведения системы под нагрузкой: линейная модель соответствует пропорциональному росту/падению без насыщения; полиномиальная модель (степень ≥ 2) указывает на наличие нелинейных эффектов насыщения, ускорения или замедления роста; экспоненциальная модель характерна для систем с резким ростом/падением показателей; логарифмическая модель отражает затухающий эффект. Вероятные типы регрессионных моделей и возможная интерпретация представлены в табл. 3.

Таблица 3. Вероятные типы регрессионных моделей и возможная интерпретация зависимостей в системе под нагрузкой

Table 3. Probable types of regression models and possible interpretation of dependencies in the system under load

X, Y	Вероятная лучшая модель Probable best model	Возможная интерпретация результатов Possible interpretation of results
$X = \text{cpuCores},$ $Y = \text{tps}$	Полиномиальная или логарифмическая Polynomial or logarithmic	Полиномиальная модель — система достигает предела масштабируемости по CPU. Линейная модель - система эффективно использует дополнительные ядра, что указывает на отсутствие блокировок и IO-ограничений. При нелинейности требуется искать узкие места в БД, сети или синхронизации.
$X = \text{ramCores},$ $Y = \text{tAvg}$	Экспоненциальная или полиномиальная Exponential or polynomial	Экспоненциальная модель указывает на сильное влияние нехватки памяти (свопинг, GC). Линейная модель - влияние RAM незначительно. Определить оптимальный порог ramCores, после которого tAvg стабилизируется. При экспоненциальной зависимости: увеличить RAM критично.
$X = \text{tps},$ $Y = \text{tAvg}$	Экспоненциальная или полиномиальная Exponential or polynomial	Экспоненциальная модель подтверждает закон теории массового обслуживания (M/M/1). Низкий R^2 может указывать на нестабильность системы. Определить предел устойчивой нагрузки (например, TPS при tAvg < 1000 мс). Установить ограничения на входной поток (rate limiting).
$X = \text{uCpu},$ $Y = \text{tAvg}$	Полиномиальная Polynomial	Нелинейность указывает на пороговое поведение. Линейная модель - система устойчива даже при высокой загрузке. Поддерживать uCpu < 75% в продакшене. Оптимизировать CPU-интенсивные участки кода.

X, Y	Вероятная лучшая модель Probable best model	Возможная интерпретация результатов Possible interpretation of results
$X = \text{TpS}$ $Y = \text{qSuccess}$	Логарифмическая или полиномиальная Logarithmic or polynomial	Логарифмическая модель - плавная деградация. Полиномиальная - резкое падение (например, отказ бэкенда). Определить максимальный безопасный TPS ($\text{qSuccess} > 99\%$). Реализовать circuit breaker или fallback-логику.
$X = \text{uCpu}$, $Y = \text{qSuccess}$	Полиномиальная Polynomial	Нелинейное падение указывает на критическую зависимость надёжности от CPU. Внедрить автомасштабирование при высокой загрузке CPU. Оптимизировать алгоритмы (например, кэширование, асинхронная обработка).

Вывод. Предложенная методика представляет системный подход к анализу зависимостей производительности API специализированного программного обеспечения (СПО), основанный на принципах прикладной статистики и инженерной интерпретации. Она может быть использована для принятия обоснованных инфраструктурных решений, а также для рационального сокращения объёма нагрузочного тестирования.

Методика опирается на сравнение скорректированного коэффициента детерминации для нескольких регрессионных моделей, при этом предварительно выполняется опциональная фильтрация выбросов по межквартильному размаху (IQR) - одновременно для обеих переменных (X и Y).

В анализ включаются только модели, для которых уравнение регрессии статистически значимо (по F-критерию), а также дополнительно рассчитывается выборочная остаточная дисперсия, для оценки точности подгонки модели к данным.

Подход позволяет обоснованно связывать статистические результаты с архитектурными ограничениями системы, опираясь на инженерные гипотезы о её внутренних механизмах.

Методика позволяет транслировать статистические паттерны в конкретные инженерные действия: оптимизацию инфраструктуры, рефакторинг кода, настройку масштабирования.

Предварительные гипотезы о характере зависимостей позволяют осознанно сокращать объём нагрузочного тестирования.

Например, вместо проведения полного цикла тестов на всех возможных конфигурациях, можно построить статистическую модель и экстраполировать поведение системы, ограничившись проверкой в нескольких контрольных точках для верификации модели. Это существенно снижает затраты на тестирование без потери точности прогнозов.

Библиографический список:

1. Черняева С.Н., Коробова Л.А., Бугаев Ю.В. Алгоритм коллективного выбора на необозримом для лица принимающего решения множестве альтернатив //Инженерные технологии. – 2024. – № 1(5). – С. 22-27. – EDN JMQXRJ.
2. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие / В.Е. Гмурман. — 12-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшее образование, 2006. — 479 с.
3. Черняева С.Н., Коробова Л.А. Анализ вырожденности матриц экспертного упорядочивания в задачах коллективного выбора//Моделирование энергоинформационных процессов: Сборник статей XII национальная научно-практическая конференция с международным участием.– Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2024. – С. 213-224. – EDN IDJAIF.
4. Кремер Н.Ш., Путко Б.А. Эконометрика. — М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. — 315 с.
5. Ивлиев, М.Н. Финансовая математика. Методы и модели в экономике. Сборник задач: учебное пособие / М.Н. Ивлиев, Л.А. Коробова, К.В. Чекудаев. – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2019. – 91 с. – ISBN 978-5-00032-444-8. – EDN MHQVNZ.
6. Корчуганова М.А. Лабораторный практикум по дисциплине «Эконометрика»: учебное пособие Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. — 91 с.
7. Implementation of the Extrapolation Method of Expert Assessments in Selection Problems / S. Chernyaeva, L. Korobova, M. Ivliev [et al.] // High-Performance Computing Systems and Technologies in Scientific Research, Automation of Control and Production, Barnaul, 15–16 мая 2020 года / Vladimir Jordan Nikolay Filimonov Ilya Tarasov Vladimir Faerman (Eds.). Vol. 1304. – Barnaul: Springer, 2020. – P. 147-161. – DOI 10.1007/978-3-030-66895-2_10. – EDN HINSXG.

8. Хныкин, Д.Е. Методология и результаты применения обратного инжиниринга / Д. Е.Хныкин, Л.А. Коробова // Инженерные технологии. – 2025. – № 1(9). – С. 30-35. – EDN UVTHPV.
9. Бугаев Ю.В., Л.А. Коробова, Шурупова И.Ю. О статистической устойчивости оптимального решения, найденного по уравнению регрессии//Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2024. – Т.86, № 2(100). – С. 48-55. DOI 10.20914/2310-1202-2024-2-48-55.

References:

1. Chernyaeva S.N., L.A. Korobova, Yu.V. Bugaev. Algorithm of collective choice on a set of alternatives that is boundless for the decision maker. *Engineering technologies*. 2024;1(5): 22-27. - EDN JMQXRJ.
2. Gmurman, V.E. Probability theory and mathematical statistics: textbook. - 12th ed., revised and enlarged. - Moscow: Higher education, 2006; 479 p.
3. Chernyaeva S.N., Korobova L.A. Analysis of the degeneracy of expert ordering matrices in collective choice problems. Modeling of energy-information processes: Collection of articles of the XII national scientific and practical conference with international participation. - Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies, 2024; 213-224. - EDN IDJAIF.
4. Kremer N.Sh., Putko B.A. Econometrics. - Moscow: UNITY-DANA, 2002. - 315 p.
5. Ivliev, M.N. Financial Mathematics. Methods and Models in Economics. Collection of problems: textbook / M.N. Ivliev, L.A. Korobova, K.V. Chekudaev. – Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies, 2019; 91 p. – ISBN 978-5-00032-444-8. – EDN MHQVNZ.
6. Korchuganova M.A. Laboratory practical training in the discipline "Econometrics": Tomsk: Publishing house of Tomsk Polytechnic University, 2016; 91 p.
7. Implementation of the Extrapolation Method of Expert Assessments in Selection Problems / S. Chernyaeva, L. Korobova, M. Ivliev [et al.] High-Performance Computing Systems and Technologies in Scientific Research, Automation of Control and Production, Barnaul, May 15-16, 2020 / Vladimir Jordan Nikolay Filimonov Ilya Tarasov Vladimir Faerman (Eds.) – Barnaul: Springer, 2020;1304: 47-161. – DOI 10.1007/978-3-030-66895-2_10. – EDN HINSXG.
8. Khnykin, D.E. Methodology and results of applying reverse engineering / D.E. Khnykin, L.A. Korobova *Engineering technologies*. 2025;1(9):30-35. – EDN UVTHPV.
9. Bugayev Yu.V., Korobova L.A., Shurupova I.Yu. On the statistical stability of the optimal solution found by the regression equation *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2024;86(2(100)):48-55. – DOI 10.20914/2310-1202-2024-2-48-55. – EDN IYNADI.

Сведения об авторах:

Литвиненко Лилия Валериевна, магистрант, кафедра информационных технологий, моделирования и управления; litvinenko.lilia01@mail.ru

Коробова Людмила Анатольевна, кандидат технических наук, доцент, доцент, кафедра информационных технологий, моделирования и управления; Lyudmila_korobova@mail.ru

Толстова Ирина Сергеевна, старший преподаватель, кафедра информационных технологий, моделирования и управления; irin2102ka@mail.ru

Information about authors:

Liliya V. Litvinenko, Master's Student, Department of Information Technology, Modeling, and Management; litvinenko.lilia01@mail.ru

Lyudmila A. Korobova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Information Technology, Modeling, and Management; Lyudmila_korobova@mail.ru

Irina Sergeevna Tolstova, Senior Lecturer, Department of Information Technology, Modeling, and Management; irin2102ka@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 04.11.2025.

Одобрена после рецензирования/Reviced 09.12.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 17.01.2026.

**Упрощённая математическая модель динамики беспилотного
транспортного средства с двумя поворотными осями**

И.В. Лобачев, А.Л. Масленников

МГТУ им. Н.Э. Баумана,

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, с. 1, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является создание эффективной модели динамики беспилотного транспортного средства с двумя поворотными осями, пригодной для разработки алгоритмов автономного управления. **Метод.** Исследование основано на методах математического моделирования. **Результат.** В работе представлена математическая модель динамики беспилотного транспортного средства (БТС) с двумя поворотными осями, которая учитывает движение центра масс, динамику подвески, вращение корпуса вокруг центра масс по углам тангажа и крена, влияние отрыва колёс от опорной поверхности вследствие деформации подвески и изменения вертикальных нагрузок, силу тяжести в продольном движении при наклоне кузова. Предложен аналитический метод расчёта главных моментов инерции, основанный на геометрических параметрах и положении кузова, колёс и центра масс груза. В целях упрощения моделирования приняты допущения: не учитывается динамика вращения колёс, взаимодействие шин с дорогой описано упрощённо, а динамика силовой установки и рулевых приводов представлены дифференциальными уравнениями первой степени. **Вывод.** Входы и выходы математической модели соответствуют реальным сигналам в бортовом комплексе управления, что обеспечивает её применимость для разработки и отладки алгоритмов управления. Результаты моделирования показали корректность описанных соотношений для моделирования динамики БТС и их применимость для задач отладки систем управления движением БТС.

Ключевые слова: математическое моделирование, динамика беспилотного транспортного средства, две поворотных оси, динамика подвески, вычисление моментов инерции, автоматическое управление, алгоритмы управления

Для цитирования: И.В. Лобачев, А.Л. Масленников. Упрощённая математическая модель динамики беспилотного транспортного средства с двумя поворотными осями. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(1):123-138. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-123-138.

**Simplified mathematical model of the dynamics of an unmanned vehicle
with two steering axes**

I.V. Lobachev, A.L. Maslennikov

Bauman Moscow State Technical University,
2nd Baumanskaya St., Moscow 105005, Russia

Abstract. Objective. The aim of this study is to create an effective model of the dynamics of a dual-axis unmanned vehicle, suitable for developing autonomous control algorithms. **Method.** The study is based on mathematical modeling methods. **Result.** This paper presents a mathematical model describing the dynamics of an unmanned vehicle with two steering axes. It considers the dynamics of the center of mass, suspension dynamics, body rotation around the center of mass at pitch and roll angles, the effect of wheel lift-off due to suspension deformation and changes in vertical loads, and the force of gravity during longitudinal movement when the body is tilted. An analytical method for calculating the moments of inertia about the main axes is proposed, based on the geometric parameters and position of the body, wheels, and the center of mass of the load.

To simplify the modeling, the following assumptions were made: wheel rotational dynamics are not considered, tire-road interaction is described in a simplified manner, and the dynamics of the power and steering gears approximated by first order differential equations. **Conclusion.** The input and output of the proposed mathematical model correspond to real signals from the onboard control system, ensuring its applicability for debugging control algorithms under conditions close to operational ones. The simulation results demonstrated the correctness of the described relationships for modeling unmanned vehicle dynamics and their applicability for debugging motion control systems.

Keywords: mathematical modeling, vehicle dynamics, two steering axes, suspension dynamics, calculation of moments of inertia, autonomous control, control algorithms

For citation: I.V. Lobachev, A.L. Maslennikov. Simplified mathematical model of the dynamics of an unmanned vehicle with two steering axes. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):123-138. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-123-138.

Введение. Внедрение беспилотных решений в закрытых промышленных территориях, например беспилотных карьерных самосвалов в карьерах, как вида беспилотных транспортных средств (БТС), имеет свои особенности ввиду более контролируемых условий эксплуатации и большей юридической определённости [1]. На практике подобные решения реализуют, в частности, Volvo, Komatsu и КАМАЗ [2], демонстрируя особенности конструкций (безкабинная компоновка, две поворотные оси, гибридные силовые установки, высокий кузов), которые определяют специфические требования к необходимости разработки математической модели [3].

Постановка задачи. Для разработки системы управления, обеспечивающей автономное движение БТС в карьере, необходимо разработать математическую модель одновременно достаточной степени адекватности и рациональной сложности для эффективного моделирования пространственного движения [4].

Математическое моделирование широко применяется в автомобильной отрасли для исследования функционирования дорожно-транспортных систем и их безопасности [5, 6], так и в сфере исследования динамики транспортных средств (ТС). Существует большое количество математических моделей колёсных ТС, как основы БТС, которые описывают продольную [7, 8], боковую динамику [9] и контакт шин с дорогой [10, 11], а также рулевое управление [12]. Модели силовой установки и её взаимодействие с ходовой частью подробно рассматриваются в работах, посвящённых моделированию приводных систем и оптимизации их параметров [13, 14]. В ряде работ рассматривается детальное моделирование подвески, включая активные схемы [15, 16]. Имеются примеры моделирования карьерных самосвалов и тяжёлой техники в целом, но предлагаемые подходы требуют значительных вычислительных ресурсов для полноценного трёхмерного моделирования [17, 18].

Таким образом, существует достаточно большое количество математических моделей различных систем и подсистем ТС, которые в целом могут рассматриваться как математические модели БТС. Однако остаётся нерешённой задача создания комплексной и в то же время вычислительно эффективной модели карьерного БТС с двумя поворотными осями, пригодной для разработки алгоритмов автономного управления.

Методы исследования. В работе предлагается упрощённая, но комплексная математическая модель БТС, учитывающая динамику центра масс (ЦМ), подвески, вращение вокруг ЦМ, влияние отрыва колёс и изменение нагрузок при движении на уклонах, которая включает алгоритма расчёт моментов инерции в зависимости от геометрии и загрузки БТС, а также блок расчёта кинематики поворота с двумя поворотными осями. Описаны системы координат, динамика рулевого управления, силовой установки, расчёт моментов инерции, динамика подвески, а также динамика плоского, и вращательного движения БТС, а также его движения в вертикальной плоскости. Проведено математическое моделирование описанной системы при движении по заданному маршруту с заданной скоростью.

Для формируемой математической модели введены стартовая, нормальная и связанная системы координат (СК), как показано на рис. 1 [19]. Стартовая СК неподвижна, горизонтальная плоскость $O_0X_0Z_0$ образована осями O_0X_0 , направленной вверх и O_0Z_0 , направленной вправо, ось O_0Y_0 направлена вверх. Нормальная СК $OX_gY_gZ_g$ подвижна, ось OY_g направлена вверх по местной вертикали, ось OX_g направлена из ЦМ БТС вперёд, ось OZ_g направлена из ЦМ вправо. Связанная СК $OXYZ$ подвижна, ось OX расположена в плоскости симметрии БТС и направлена от задней к передней его части, ось OY расположена в одной плоскости с осью OX и направлена к верхней части БТС, ось OZ направлена к правой части БТС, если смотреть вперёд по оси OX .

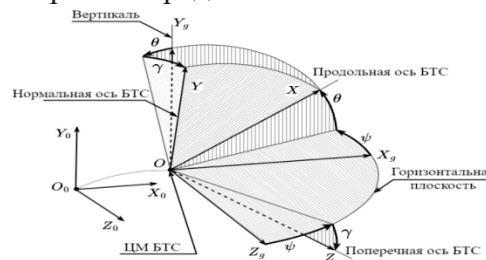


Рис. 1 – СК и углы Эйлера, используемые в работе
 Fig. 1 – Coordinate systems and Euler angles used in the paper

Для кинематических соотношений определено, что угол рыскания ψ определяется как угол между осью OX_g и проекцией продольной скорости вдоль оси OX на горизонтальную плоскость OX_gZ_g , угол тангажа θ как угол между OX и плоскостью OX_gZ_g , а угол крена γ как угол между OZ и осью OZ_g при нулевом рыскании. Предлагаемая математическая модель может быть представлена в виде блочной структуры, которая представлена на рис. 2, где пунктирными линиями отмечены связи, являющиеся опциональными, которые могут присутствовать в случае необходимости, однако в рамках данной работы не рассматриваются.

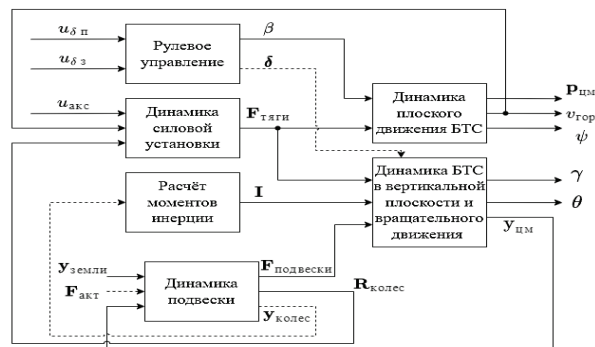


Рис. 2 – Структура математической модели БТС
 Fig. 2 – USV mathematical model scheme

В модели выделяются следующие блоки-подмодели: расчёт моментов инерции, динамика силовой установки, рулевое управление, горизонтальная динамика, динамика движения в вертикальной плоскости, динамика движения вокруг ЦМ, динамика подвески. Далее рассмотрены математические описания каждого блока – каждой подсистемы

Рулевое управление. Блок описывает кинематику и динамику рулевого управления и принимает на вход управляющие воздействия $u_{\delta п}$, $u_{\delta з}$ – желаемые углы поворота передней и задней осей соответственно в радианах, не превышающие по модулю $u_{\delta п max}$, $u_{\delta з max}$, что математически можно записать в виде:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_{\pi} = \frac{1}{\tau_{\delta_{\pi}}} (u_{\delta_{\pi}} - \delta_{\pi}), |u_{\delta_{\pi}}| < u_{\delta_{\pi} \max} \\ \dot{\delta}_{\delta_3} = \frac{1}{\tau_{\delta_{\delta_3}}} (u_{\delta_{\delta_3}} - \delta_{\delta_3}), |u_{\delta_{\delta_3}}| < u_{\delta_{\delta_3} \max} \end{cases} \quad (1)$$

где $\tau_{\delta_{\pi}}$, $\tau_{\delta_{\delta_3}}$ – постоянные времени поворота, с; δ_{π} – угол поворота передней оси, рад; δ_{δ_3} – угол поворота задней оси, рад.

Результатом интегрирования системы (1) являются углы поворота передней и задней осей, согласно которым далее определяется вектор углов поворота отдельных колёс $\delta = [\delta_{\pi л}, \delta_{\pi п}, \delta_{\delta_3 л}, \delta_{\delta_3 п}]^T$ (пл – переднее левое, пп – переднее правое, зл – заднее левое, зп – заднее правое) и угол увода β согласно соотношению [20]:

$$\beta = \arctg \left(\frac{L_{\pi} \operatorname{tg}(\delta_{\delta_3}) + L_{\delta_3} \operatorname{tg}(\delta_{\pi})}{L_{\pi\pi}} \right) \quad (2)$$

где L_{π} – расстояние от центра масс БТС до его передней оси, м; L_{δ_3} – расстояние от центра масс БТС до задней оси, м. Для L_{π} и L_{δ_3} , выполняется соотношение для общей длины шасси БТС $L_{\pi} + L_{\delta_3} = L_{\pi\pi}$.

Для определения вектора углов поворота колёс $\delta = [\delta_{\pi л}, \delta_{\pi п}, \delta_{\delta_3 л}, \delta_{\delta_3 п}]^T$ используется следующая последовательность вычислений. Сначала определяются координаты $O_{\text{МЦВ}} = [x_{\text{МЦВ}} \ 0 \ z_{\text{МЦВ}}]^T$ мгновенного центра вращения (МЦВ) в связанной с БТС СК

$$\begin{aligned} x_{\text{МЦВ}} &= L_{\pi} - t \sin(\delta_{\pi}) \\ z_{\text{МЦВ}} &= -t \cos(\delta_{\pi}) \end{aligned} \quad (3)$$

по следующим соотношениям:

$$t = \frac{(L_{\pi} + L_{\delta_3})}{\sin(\delta_{\pi} - \delta_{\delta_3})} \cos(\delta_{\delta_3}). \quad (4)$$

Если знаменатель ур. (4) стремится к нулю, то БТС движется прямолинейно. Иначе вычисляется кривизна траектории κ , обратно пропорциональная радиусу поворота $R_{\text{поворота}}$:

$$\kappa = \frac{1}{R_{\text{поворота}}} = \frac{\operatorname{tg}(\delta_{\pi}) - \operatorname{tg}(\delta_{\delta_3})}{L_{\pi} + L_{\delta_3}} \quad (5)$$

Углы поворота колёс без учёта геометрии Аккермана принимаются равными углам поворота соответствующих осей как $\delta = [\delta_{\pi л}, \delta_{\pi п}, \delta_{\delta_3 л}, \delta_{\delta_3 п}]^T$. Для соблюдения геометрии Аккермана, используются ранее вычисленные координаты МЦВ, а также вычисляются положения колёс в связанной СК:

$$\begin{cases} O'_{\pi л} = [L_{\pi} \ 0 \ -W_{\pi л}]^T \\ O'_{\pi п} = [L_{\pi} \ 0 \ W_{\pi п}]^T \\ O'_{\delta_3 л} = [-L_{\delta_3} \ 0 \ -W_{\delta_3 л}]^T \\ O'_{\delta_3 п} = [-L_{\delta_3} \ 0 \ W_{\delta_3 п}]^T \end{cases} \quad (6)$$

где W_{π} – расстояние от ЦМ до правого края БТС, W_{δ_3} – расстояние от ЦМ до левого края БТС.

Тогда, векторы направлений от центра поворота к каждому из колёс определяются согласно соотношению:

$$\mathbf{p}_{\text{МЦВ}, i} = \mathbf{O}_{\text{МЦВ}} - \mathbf{O}_i = \begin{bmatrix} p_{x,i} \\ p_{y,i} \\ p_{z,i} \end{bmatrix}, i = (\text{пл}, \text{пп}, \text{зл}, \text{зп}) \quad (7)$$

На основании продольной $p_{x,i}$ и боковой $p_{z,i}$ компонент вектора направления каждого колеса до МЦВ, определяется его угол поворота колеса в зависимости от направления поворота:

$$\delta_i = \begin{cases} \arctg\left(\frac{p_{x,i}}{p_{z,i}}\right), z_{\text{МЦВ}} > 0 \\ -\arctg\left(\frac{p_{x,i}}{-p_{z,i}}\right), z_{\text{МЦВ}} < 0 \end{cases}, i = (\text{пл}, \text{пп}, \text{зл}, \text{зп}) \quad (8)$$

Динамика силовой установки. Блок описывает динамику изменения тяговых сил на каждом из колёс в отдельности, возникающих вследствие работы силовой установки и распределения её тягового момента между колёсами в зависимости от входной величины $u_{\text{акс}}$ – объединённого значения педалей акселератора и тормоза. Учитывается также соприкосновение колеса с землёй через наличие реакции в точке касания и величины силы сопротивления движению в ней. Результатом расчётов в блоке является вектор сил тяги $\mathbf{F}_{\text{тяги}} = [F_{\text{тяги пл}}, F_{\text{тяги пп}}, F_{\text{тяги зл}}, F_{\text{тяги зп}}]^T$, каждый элемент которого формируется следующим образом с учётом отрыва колеса от земли:

$$F_{\text{тяги}, i} = \begin{cases} \frac{F_{\text{тяговая}}}{4} - F_{\text{сопр}}, R_i > 0 \\ 0, R_i \leq 0 \end{cases}, i = (\text{пл}, \text{пп}, \text{зл}, \text{зп}) \quad (9)$$

где $F_{\text{тяговая}}$ – суммарная тяговая сила, подводимая к колёсам, Н; $F_{\text{сопр}}$ – сила сопротивления на колёсах, Н; R_i – вертикальная реакция в соответствующем колесе, меньшая или равная нулю при отрыве колеса от поверхности, Н.

Максимальное суммарное значение тяговой силы $F_{\text{тяговая max}}$, приводимое к колёсам, определяется по соотношению:

$$F_{\text{тяговая max}} = \frac{T_{\text{тяговый max}}}{R_{\text{колеса}}} \quad (10)$$

где $T_{\text{тяговый max}}$ – максимальный тяговый момент силовой установки, Нм; $R_{\text{колеса}}$ – радиус колеса, м.

Мгновенное значение тяговой крутящей силы $F_{\text{тяговая}}$, формируемое силовой установкой с учётом нажатия педали акселератора $u_{\text{акс}}$, определяется через решение дифференциального уравнения:

$$\dot{F}_{\text{тяговая}} = \frac{1}{\tau_{\text{СУ}}} (u_{\text{акс}} F_{\text{тяговая max}} - F_{\text{тяговая}}), u_{\text{акс}} \in [-1; 1] \quad (11)$$

где $\tau_{\text{СУ}}$ – постоянная времени аperiodического процесса, с.

Крутящая сила, подводимая к колесу, учитывается лишь в случае положительного значения силы реакции $R_i, i \in \{\text{пл}, \text{пп}, \text{зл}, \text{зп}\}$ в данном колесе. Помимо этого, силовая установка теряет силу, подводимую к колёсам, на преодоление сопротивления, увеличивающегося с ростом скорости. Если допустить, что БТС представляет собой карьерный самосвал с электрическим тяговым приводом, то силу сопротивления $F_{\text{сопр}}$ можно аппроксимировать соотношением [13, 17]:

$$F_{\text{сопр}} = C_{\text{сопр}} v_{\text{гор}}^4 \text{sign}(v_{\text{гор}}) \quad (12)$$

где $C_{\text{сопр}}$ – коэффициент сопротивления, который можно вычислить, например, согласно соотношению для того, чтобы при максимальной заданной скорости БТС вся тяговая сила $F_{\text{тяговая}}$ уходила на преодоление сопротивления, $\frac{F_{\text{тяговая}}}{4} - F_{\text{сопр}} = 0$:

$$C_{\text{сопр}} = \frac{F_{\text{тяговая max}}}{4v_{\text{гор max}}^4}, \quad (13)$$

где $v_{\text{гор max}}$ – максимальная желаемая горизонтальная скорость БТС, м/с. Четвёртая степень в знаменателе означает, что суммарная сила сопротивления поровну делится между четырьмя колёсами.

Расчёт моментов инерции. Блок позволяет рассчитать инерционные свойства системы, состоящей из шасси БТС, груза и колёс, с учётом их геометрических параметров в виде тензора инерции системы

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix}, \quad (14)$$

который состоит из моментов инерции системы вокруг осей OX , OY и OZ , и вычисляемый как:

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_{\text{ш ЦМ}} + \mathbf{I}_{\text{г ЦМ}} + \sum_{i=\{\text{пл, пп, зл, зп}\}} \mathbf{I}_{\text{к ЦМ}, i} \quad (15)$$

где $\mathbf{I}_{\text{ш ЦМ}}$ – тензор инерции шасси при вращении вокруг ЦМ, вычисляемый по (27); $\mathbf{I}_{\text{г ЦМ}}$ – тензор инерции груза при вращении вокруг ЦМ, вычисляемый по (28); $\mathbf{I}_{\text{к ЦМ}, i}$ – тензор инерции каждого из колёс при вращении вокруг ЦМ, вычисляемый по (29). Тензор инерции каждого из тел системы полагается неизменным. Считается, что элементы, не принадлежащие главной диагонали, малы, и ими возможно пренебречь.

Динамика подвески. Блок позволяет определить силы, возникающие в подвеске [21] исходя из высоты поверхности $\mathbf{y}_{\text{земли}} = [y_{\text{земли пл}}, y_{\text{земли пп}}, y_{\text{земли зл}}, y_{\text{земли зп}}]^T$ под колёсами и величины опциональной активной силы $\mathbf{F}_{\text{акт}} = [F_{\text{акт пл}}, F_{\text{акт пп}}, F_{\text{акт зл}}, F_{\text{акт зп}}]^T$ в подвеске каждого из колёс. Выходом подсистемы динамики подвески являются силы $\mathbf{F}_{\text{подв}} = [F_{\text{подв пл}}, F_{\text{подв пп}}, F_{\text{подв зл}}, F_{\text{подв зп}}]^T$, создаваемые подвеской каждого из колёс, вычисляемые как:

$$F_{\text{подв}, i} = F_{\text{акт}, i} - F_{\text{упр}, i}, \quad i = (\text{пл, пп, зл, зп}) \quad (16)$$

где $F_{\text{упр}, i}$ – упругая сила, создаваемая элементами подвески, Н, которая, если модель подвески – «пружина-демпфер», определяется соотношением:

$$F_{\text{упр}, i} = K_s (y_{\text{шасси}, i} - y_{\text{к}, i} - L_0) + B_s (\dot{y}_{\text{шасси}, i} - \dot{y}_{\text{к}, i}), \quad i = (\text{пл, пп, зл, зп}) \quad (17)$$

где $y_{\text{шасси}, i}$ – высота шасси над уровнем поверхности, м; $y_{\text{к}, i}$ – высота колеса над уровнем поверхности, м; $\dot{y}_{\text{шасси}, i}$ – вертикальная скорость шасси над колесом, м/с; $\dot{y}_{\text{к}, i}$ – вертикальная скорость колеса, м/с; K_s – коэффициент упругости пружины, Н/м; B_s – коэффициент демпфирования подвески, Нс/м.

Координаты и скорости шасси в предположении малости углов крена и тангажа вычисляются по следующим соотношениям:

$$\begin{aligned}
 y_{\text{шасси пл}} &= y_{\text{ЦМ}} + L_{\text{п}} \sin(\theta) + W_{\text{л}} \sin(\gamma) \\
 y_{\text{шасси пп}} &= y_{\text{ЦМ}} + L_{\text{п}} \sin(\theta) - W_{\text{п}} \sin(\gamma) \\
 y_{\text{шасси зл}} &= y_{\text{ЦМ}} - L_{\text{з}} \sin(\theta) + W_{\text{л}} \sin(\gamma) \\
 y_{\text{шасси зп}} &= y_{\text{ЦМ}} - L_{\text{з}} \sin(\theta) - W_{\text{п}} \sin(\gamma) \\
 \dot{y}_{\text{шасси пл}} &= \dot{y}_{\text{ЦМ}} + L_{\text{п}} \dot{\theta} + W_{\text{л}} \dot{\gamma} \\
 \dot{y}_{\text{шасси пп}} &= \dot{y}_{\text{ЦМ}} + L_{\text{п}} \dot{\theta} - W_{\text{п}} \dot{\gamma} \\
 \dot{y}_{\text{шасси зл}} &= \dot{y}_{\text{ЦМ}} + L_{\text{з}} \dot{\theta} + W_{\text{л}} \dot{\gamma} \\
 \dot{y}_{\text{шасси зп}} &= \dot{y}_{\text{ЦМ}} + L_{\text{з}} \dot{\theta} - W_{\text{п}} \dot{\gamma}
 \end{aligned} \tag{18}$$

Реакции в точке касания каждого из колёс с поверхностью, вычисляются как:

$$R_i = -K_t (y_{\text{колёса}, i} - y_{\text{земли}, i} - R_k), i = (\text{пл}, \text{пп}, \text{зл}, \text{зп}) \tag{19}$$

где K_t – коэффициент упругой силы в шине, Н/м; R_k – радиус колеса, м.

Высоты колёс $y_{\text{колёс}} = [y_{\text{к пл}}, y_{\text{к пп}}, y_{\text{к зл}}, y_{\text{к зп}}]^T$ определяются их динамикой, формируемые для каждого колеса дифференциальным уравнением следующего вида:

$$\begin{aligned}
 m_k \ddot{y}_{\text{к}, i} &= -F_{\text{подв}, i} - K_t (y_{\text{к}, i} - y_{\text{земли}, i} - R_k) - m_k g \cos(\gamma) \cos(\theta), \\
 i &= (\text{пл}, \text{пп}, \text{зл}, \text{зп})
 \end{aligned} \tag{20}$$

где m_k – масса колеса, кг; g – ускорение свободного падения, м/с².

Динамика плоского движения. В блоке на основании суммарной тяговой силы $F_{\text{тяги}}$ на колёсах, а также текущего угла увода β , определяются положение ЦМ в горизонтальной плоскости стартовой СК $\mathbf{p}_{\text{ЦМ}} = [x_{0 \text{ ЦМ}}, 0, z_{0 \text{ ЦМ}}]^T$, горизонтальная скорость $v_{\text{гор}}$, а также угол рыскания ψ , решением системы дифференциальных уравнений [22] в соответствии с кинематической схемой велосипедной модели, представленной на рис. 3:

$$\begin{cases} \dot{x}_{0 \text{ ЦМ}} = v_{\text{гор}} \cos(\psi + \beta) \\ \dot{z}_{0 \text{ ЦМ}} = -v_{\text{гор}} \sin(\psi + \beta) \\ \dot{\psi} = \frac{v_{\text{гор}}}{L_{\text{ш}}} (\sin(\delta_{\text{п}} - \beta) + \sin(\delta_{\text{з}} + \beta)) \\ \dot{v}_{\text{гор}} = \frac{1}{M_{\text{полная}}} F_{\text{тяги}} \end{cases} \tag{21}$$

где $M_{\text{полная}}$ – полная масса БТС, кг, определяемая из соотношения:

$$M_{\text{полная}} = M_{\text{ш}} + M_{\text{г}} + 4m_k, \tag{22}$$

где $M_{\text{ш}}$ – масса шасси БТС, кг; $M_{\text{г}}$ – масса груза, кг; m_k – масса колеса, кг.

Суммарная сила, действующая на БТС с учётом силы тяжести, вычисляется как:

$$F_{\text{тяги}} = \sum_{i=\{\text{пл}, \text{пп}, \text{зл}, \text{зп}\}} F_{\text{тяги}, i} - M_{\text{полная}} g \sin(\theta) \tag{23}$$

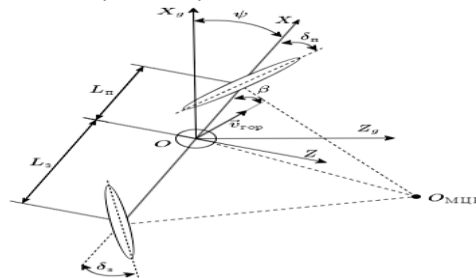


Рис. 3 – Кинематическая схема поворота велосипедной модели
Fig. 3 – Kinematic diagram of the bicycle model turn

Динамика в вертикальной плоскости и вращательное движение. Блок позволяет учесть влияние работы подвески на вертикальное перемещение ЦМ и вращение БТС вокруг него. Выходами этой подсистемы являются углы крена γ , тангажа θ и вертикальное положение ЦМ. Математическое описание данного блока представляет собой систему дифференциальных уравнений [23]:

$$\begin{cases} I_z \ddot{\theta} = (F_{\text{подв пл}} + F_{\text{подв пп}})L_{\text{п}} - (F_{\text{подв зл}} + F_{\text{подв зп}})L_{\text{з}} - \\ \quad - \sum_{i=\{\text{пл, пп, зл, зп}\}} (y_{\text{колеса, } i} - y_{\text{ЦМ}})F_{\text{тяги, } i} \\ I_x \ddot{\gamma} = (F_{\text{подв пл}} + F_{\text{подв зл}})W_{\text{л}} - (F_{\text{подв пп}} + F_{\text{подв зп}})W_{\text{п}} \\ M_{\text{ресс}} \ddot{y}_{\text{ЦМ}} = \sum_{i=\{\text{пл, пп, зл, зп}\}} F_{\text{подв, } i} - M_{\text{ресс}} g \cos(\theta) \cos(\gamma) \end{cases} \quad (24)$$

где $M_{\text{ресс}}$ – масса подрессоренной части БТС, поддерживаемой подвеской и располагающейся над ней, кг, которая определяется из соотношения:

$$M_{\text{ресс}} = M_{\text{ш}} + M_{\text{г}}. \quad (25)$$

С учётом влияния поворота колёс на изменение углов тангажа и крена, система уравнений (25) примет вид:

$$\begin{cases} I_z \ddot{\theta} = (F_{\text{подв пл}} + F_{\text{подв пп}})L_{\text{п}} - (F_{\text{подв зл}} + F_{\text{подв зп}})L_{\text{з}} - \\ \quad - \sum_{i=\{\text{пл, пп, зл, зп}\}} (y_{\text{колеса, } i} - y_{\text{ЦМ}})F_{\text{тяги, } i} \cos(\delta_i) \\ I_x \ddot{\gamma} = (F_{\text{подв пл}} + F_{\text{подв зл}})W_{\text{л}} - (F_{\text{подв пп}} + F_{\text{подв зп}})W_{\text{п}} - \\ \quad - \sum_{i=\{\text{пл, пп, зл, зп}\}} (y_{\text{колеса, } i} - y_{\text{ЦМ}})F_{\text{тяги, } i} \sin(\delta_i) \\ M_{\text{ресс}} \ddot{y}_{\text{ЦМ}} = \sum_{i=\{\text{пл, пп, зл, зп}\}} F_{\text{подв, } i} - M_{\text{ресс}} g \cos(\theta) \cos(\gamma) \end{cases} \quad (26)$$

Алгоритм расчёта положения ЦМ и тензора инерции БТС. Для определения моментов инерции системы используется алгоритм, основанный на представлении БТС в виде набора тел и расчёте моментов инерции данной системы: шасси представляется в виде параллелепипеда массой $M_{\text{ш}}$, длиной $L_{\text{ш}}$, шириной $W_{\text{ш}}$ и высотой $H_{\text{ш}}$; груз представляется в виде параллелепипеда массой $M_{\text{г}}$, длиной $L_{\text{г}}$, шириной $W_{\text{г}}$ и высотой $H_{\text{г}}$, смещённый от центра шасси на $x_{\text{г}}$ и $z_{\text{г}}$; колёса представляются в виде четырёх цилиндров массой $m_{\text{к}}$, радиусом $R_{\text{к}}$ и толщиной $d_{\text{к}}$. Кинематическая схема рассматриваемой системы приведена на рис.3.

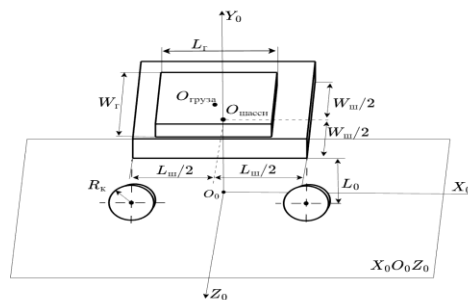


Рис. 4 – Кинематическая схема рассматриваемой системы
 Fig. 4 – Kinematic diagram of the system under consideration

По заданным массогабаритным параметрам объектов, определяются их тензоры инерции при вращении вокруг собственных ЦМ, в соответствии с соотношениями:

$$\begin{aligned} I_{x \text{ шасси}} &= \frac{M_{\text{ш}}}{12}(W_{\text{ш}}^2 + H_{\text{ш}}^2), \quad I_{y \text{ шасси}} = \frac{M_{\text{ш}}}{12}(W_{\text{ш}}^2 + L_{\text{ш}}^2), \quad I_{z \text{ шасси}} = \frac{M_{\text{ш}}}{12}(L_{\text{ш}}^2 + H_{\text{ш}}^2) \\ I_{x \text{ груза}} &= \frac{M_{\text{г}}}{12}(W_{\text{г}}^2 + H_{\text{г}}^2), \quad I_{y \text{ груза}} = \frac{M_{\text{г}}}{12}(W_{\text{г}}^2 + L_{\text{г}}^2), \quad I_{z \text{ груза}} = \frac{M_{\text{г}}}{12}(L_{\text{г}}^2 + H_{\text{г}}^2) \\ I_{x \text{ колеса}} &= \frac{m_{\text{к}}}{12}(3R_{\text{к}}^2 + d_{\text{к}}^2), \quad I_{y \text{ колеса}} = \frac{m_{\text{к}}}{12}(3R_{\text{к}}^2 + d_{\text{к}}^2), \quad I_{z \text{ колеса}} = \frac{m_{\text{к}}}{2}R_{\text{к}}^2 \end{aligned} \quad (27)$$

где $I_{x \text{ шасси}}$, $I_{y \text{ шасси}}$, $I_{z \text{ шасси}}$ – осевые моменты инерции параллелепипеда шасси $\mathbf{I}_{\text{шасси}}$; $I_{x \text{ груза}}$, $I_{y \text{ груза}}$, $I_{z \text{ груза}}$ – осевые моменты инерции параллелепипеда груза $\mathbf{I}_{\text{груза}}$; $I_{x \text{ колеса}}$, $I_{y \text{ колеса}}$, $I_{z \text{ колеса}}$ – осевые моменты инерции однородного цилиндра колеса $\mathbf{I}_{\text{колеса}}$.

Координаты ЦМ шасси $O_{\text{шасси}}$, груза $O_{\text{груза}}$, переднего левого $O_{\text{колеса пл}}$, переднего правого $O_{\text{колеса пр}}$, заднего левого $O_{\text{колеса зл}}$ и заднего правого $O_{\text{колеса зп}}$ колёс могут быть определены, исходя из свойств тел системы [24], [25] и указаний по их расположению следующим образом:

$$\begin{aligned} O_{\text{шасси}} &= \begin{bmatrix} 0 & R_{\text{к}} + L_0 + \frac{H_{\text{ш}}}{2} & 0 \end{bmatrix}^T \\ O_{\text{груза}} &= \begin{bmatrix} x_{\text{г}} & R_{\text{к}} + L_0 + H_{\text{ш}} + \frac{H_{\text{г}}}{2} & z_{\text{г}} \end{bmatrix}^T \\ O_{\text{колеса пл}} &= \begin{bmatrix} \frac{L_{\text{ш}}}{2} & R_{\text{к}} & -\frac{W_{\text{ш}}}{2} \end{bmatrix}^T \\ O_{\text{колеса пр}} &= \begin{bmatrix} \frac{L_{\text{ш}}}{2} & R_{\text{к}} & \frac{W_{\text{ш}}}{2} \end{bmatrix}^T \\ O_{\text{колеса зл}} &= \begin{bmatrix} -\frac{L_{\text{ш}}}{2} & R_{\text{к}} & -\frac{W_{\text{ш}}}{2} \end{bmatrix}^T \\ O_{\text{колеса зп}} &= \begin{bmatrix} -\frac{L_{\text{ш}}}{2} & R_{\text{к}} & \frac{W_{\text{ш}}}{2} \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (28)$$

Координаты ЦМ всей системы $O_{\text{системы}}$ определяются как:

$$O_{\text{системы}} = \frac{1}{M_{\text{ш}} + M_{\text{г}} + 4m_{\text{к}}} \left(M_{\text{ш}} O_{\text{шасси}} + M_{\text{г}} O_{\text{груза}} + m_{\text{к}} (O_{\text{колеса пл}} + O_{\text{колеса пр}} + O_{\text{колеса зл}} + O_{\text{колеса зп}}) \right) \quad (29)$$

Расстояние от ЦМ до краёв шасси определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} L_{\text{п}} &= \frac{L_{\text{ш}}}{2} - O_{\text{системы}} \\ L_{\text{з}} &= L_{\text{ш}} - L_{\text{п}} \\ W_{\text{п}} &= \frac{W_{\text{ш}}}{2} - O_{\text{системы}} \\ W_{\text{л}} &= W_{\text{ш}} - W \end{aligned} \quad (30)$$

Для определения тензора инерции системы вокруг ЦМ, необходимо сложить тензоры инерции отдельных тел системы, приведённые при помощи теоремы Штейнера для вращения вокруг центра масс системы [26], [27]:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{p}_{\text{шасси}} &= \mathbf{O}_{\text{шасси}} - \mathbf{O}_{\text{системы}} \\
 \mathbf{p}_{\text{груза}} &= \mathbf{O}_{\text{груза}} - \mathbf{O}_{\text{системы}} \\
 \mathbf{p}_{\text{колеса}, i} &= \mathbf{O}_{\text{колеса}, i} - \mathbf{O}_{\text{системы}}, i = (\text{пл}, \text{пп}, \text{зл}, \text{зп}) \\
 \mathbf{I}_{\text{шасси ЦМ}} &= \mathbf{I}_{\text{шасси}} + M_{\text{ш}} ((\mathbf{p}_{\text{шасси}} \cdot \mathbf{p}_{\text{шасси}}) \mathbf{E} - \mathbf{p}_{\text{шасси}} \otimes \mathbf{p}_{\text{шасси}}) \\
 \mathbf{I}_{\text{груза ЦМ}} &= \mathbf{I}_{\text{груза}} + M_{\text{г}} ((\mathbf{p}_{\text{груза}} \cdot \mathbf{p}_{\text{груза}}) \mathbf{E} - \mathbf{p}_{\text{груза}} \otimes \mathbf{p}_{\text{груза}}) \\
 \mathbf{I}_{\text{колеса ЦМ } i} &= \mathbf{I}_{\text{колеса}} + m_{\text{к}} ((\mathbf{p}_{\text{колеса}, i} \cdot \mathbf{p}_{\text{колеса}, i}) \mathbf{E} - \mathbf{p}_{\text{колеса}, i} \otimes \mathbf{p}_{\text{колеса}, i}), \\
 i &= (\text{пл}, \text{пп}, \text{зл}, \text{зп})
 \end{aligned} \tag{31}$$

где $\mathbf{p}_{\text{шасси}}$ – вектор расстояний от ЦМ шасси до ЦМ системы; $\mathbf{p}_{\text{груза}}$ – вектор расстояний от ЦМ груза до ЦМ системы; $\mathbf{p}_{\text{колеса}, i}$ – вектор расстояний от ЦМ каждого из колёс до ЦМ системы; $\mathbf{E}$ – единичная матрица соответствующей размерности.

Таким образом, рассматриваемая комплексная математическая модель динамики БТС, описываемая в работе, формируется уравнениями динамики плоского движения (21), динамикой в вертикальной плоскости и динамикой вращательного движения (26), динамикой колёс (20) с учётом сил в подвеске, описываемых соотношением (16), динамикой рулевого управления из соотношений (1) с учётом (8) и динамикой силовой установки, описываемой соотношением (11) с учётом силы сопротивления движению (12) и взаимодействию с опорной поверхностью (9). Вектор состояния системы $\mathbf{x}$ имеет вид:

$$\mathbf{x} = [x_{\text{ЦМ}} \ y_{\text{ЦМ}} \ \dot{y}_{\text{ЦМ}} \ z_{\text{ЦМ}} \ v_{\text{гор}} \ \psi \ \theta \ \dot{\theta} \ \gamma \ \dot{\gamma} \ y_{\text{колес}} \ \dot{y}_{\text{колес}} \ \delta_{\text{п}} \ \delta_{\text{з}} \ F_{\text{крутящая}}]^T \tag{32}$$

где вектор вертикальных скоростей каждого из колёс $\dot{y}_{\text{колес}}$ имеет вид

$$\dot{y}_{\text{колес}} = [\dot{y}_{\text{колеса пл}} \ \dot{y}_{\text{колеса пп}} \ \dot{y}_{\text{колеса зл}} \ \dot{y}_{\text{колеса зп}}]^T \tag{33}$$

и определяется интегрированием соотношения (20) для каждого из колёс; вектор высот каждого из колёс $y_{\text{колес}}$ имеет вид

$$y_{\text{колес}} = [y_{\text{колеса пл}} \ y_{\text{колеса пп}} \ y_{\text{колеса зл}} \ y_{\text{колеса зп}}]^T \tag{34}$$

и определяется интегрированием элементов вектора (33).

Постановка вычислительного эксперимента. Для проверки адекватности полученной математической модели, описанные соотношения (1) – (34) реализованы в программном коде на языке MATLAB и проведены вычислительные эксперименты, в которых БТС двигалось по маршруту, состоящему из двух точек вдоль заданных траекторий по рельефной карте окружения. Проведено два вычислительных эксперимента, которые отличались геометрическими параметрами груза при неизменной массе, что позволило оценить влияние параметров груза на динамику вращательного движения БТС.

Параметры математической модели, использованные при моделировании, приведены в табл. 1. В качестве окружения, в котором выполняется движение, выступает карта рельефа карьера, сформированная как набор зон с нулевым и фиксированным наклоном таким образом, чтобы БТС при движении между углами карты, имеющими нулевую высоту, проходило участки подъема и спуска [30]. Карта приведена на рис. 5. На карте отмечены точки маршрута. Для обеспечения движения БТС спроектирована система управления с двумя контурами управления: первый контур содержит ПИ-регулятор по величине ошибки по скорости БТС и определяет значение нажатия педали акселератора; второй контур реализует ПИ-регулирование слежения за заданным курсом, который определяется с учётом текущего положения БТС и следующей целевой точкой маршрута.

Таблица 1. Параметры математической модели
Table 1. Parameters of the mathematical model

Параметр Parameter	Значение Value
Масса шасси $M_{\text{шасси}}$, кг Chassis weight	17000
Длина шасси $L_{\text{шасси}}$, м Chassis Length	8
Высота шасси $H_{\text{шасси}}$, м Chassis Height	2
Ширина шасси $W_{\text{шасси}}$, м Chassis Width	4
Масса груза $M_{\text{груза}}$, кг Cargo Weight	8000
Длина груза $L_{\text{груза}}$, м Cargo Length	8
Высота груза $H_{\text{груза}}$, м Cargo Height	1 ÷ 6
Ширина груза $W_{\text{груза}}$, м Cargo Width	4
Продольное смещение груза $x_{\text{груза}}$, м Longitudinal Cargo Offset	0
Боковое смещение груза $z_{\text{груза}}$, м Lateral Cargo Offset	0
Масса колеса $m_{\text{колеса}}$, кг Wheel Weight	1000
Радиус колеса $R_{\text{колеса}}$, м Wheel Radius	0,85
Толщина колеса d_k , м Wheel Thickness	0,5
Длина подвески в недеформированном состоянии L_0 , м Undeformed Suspension Length	1
Коэффициент упругости подвески K_s , Н/м Suspension Elasticity	200000
Коэффициент демпфирования подвески B_s , Нс/м Suspension Damping Coefficient	100000
Коэффициент упругости колеса K_t , Н/м Wheel Elasticity	300000
Максимальный момент $T_{\text{крутящий max}}$, Нм Maximum Torque	15000
Максимальный угол поворота осей $u_{\delta \text{ перед max}}, u_{\delta \text{ зад max}}$, град Maximum Axle Steering Angle	60°
Постоянная времени силовой установки τ_{CV} , с Powertrain Time Constant,	1
Постоянная времени рулевых механизмов $\tau_{\delta \text{ перед}}, \tau_{\delta \text{ зад}}$, с Steering Time Constant	3
Максимальная желаемая горизонтальная скорость ТС $v_{\text{гор max}}$, м/с Maximum desired horizontal speed of the vehicle, m/s	11

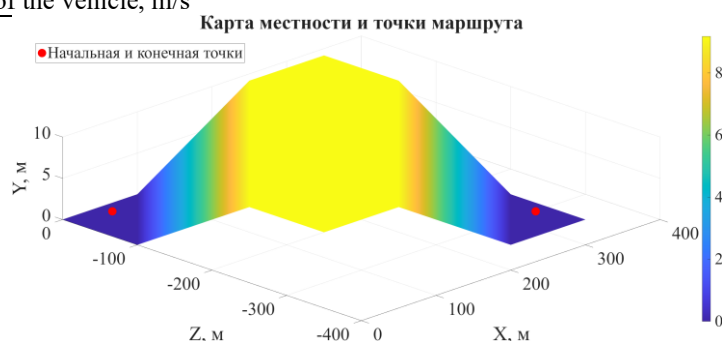


Рис. 5 – Карта рельефа и точки маршрута
Fig. 5 – Landscape map and route points

Обсуждение результатов. Результаты моделирования в виде положения БТС, сигналов управления и сил БТС, его скорости, а также углов крена и тангажа представлены 6–9 рис. 6-9. Скорость менялась от значения маневровой скорости 1 м/с до значения

крейсерской скорости 8 м/с. Полученные результаты показывают, что поведение математической модели соответствует ожиданиям – БТС движется вдоль заданного маршрута со скоростью, близкой к заданной, динамика углов Эйлера и подвески меняется в зависимости от изменения рельефа поверхности под колёсами.

Движение ТС по маршруту в пространстве

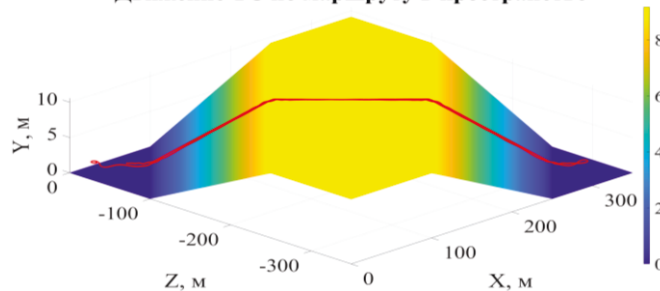


Рис. 6 –Траектория движения ТС по окружению
 Fig. 6 –Vehicle trajectory along the route

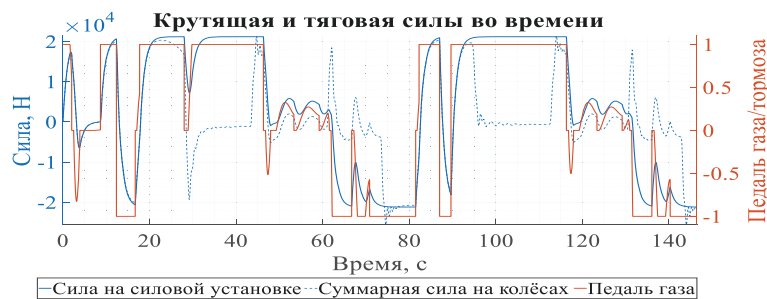


Рис. 7 – Педаль газа, сила на силовой установке и сила, подводимая к колёсам
 Fig. 7 – The gas pedal, the force on the power plant and the force supplied to the wheels

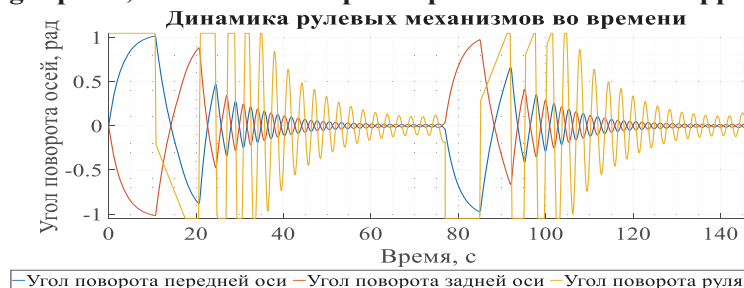


Рис. 8 – Заданный угол поворота колес и углы поворота осей во времени
 Fig. 8 – Specified wheel rotation angle and axle rotation angles over time

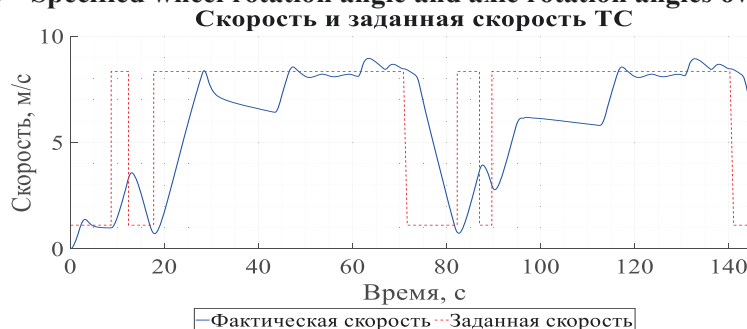


Рис. 9 – Заданная и фактическая скорости движения ТС
 Fig. 9 – Set and actual speed of the vehicle

Проведём сравнение влияния изменения массогабаритных параметров груза, а именно его высоты, на динамику БТС. Для этого проведём ещё один вычислительный эксперимент, в котором в шесть раз увеличим высоту груза при неизменных массовых параметрах. Значения углов крена и тангажа, полученные в результате моделирования, приведены на рис. 10.

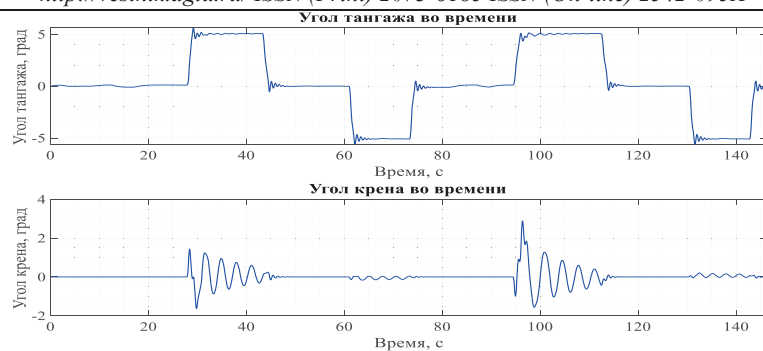


Рис. 10 – Значения углов тангажа и крена при движении по маршруту

Fig. 10 – Pitch and roll angle values when moving along the route

Результаты моделирования, проиллюстрированные на рис. 11, показывают, что при изменении массогабаритных параметров груза увеличивается амплитуда отклонений углов тангажа и крена, что соответствует поведению реального БТС и более сложных математических моделей [17]. Модель показала достаточную степень адекватности.

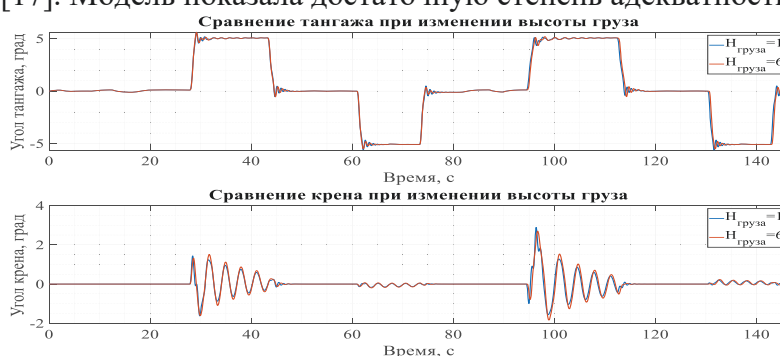


Рис. 11 – Сравнение углов тангажа и крена при увеличении высоты груза

Fig. 11 – Comparison of pitch and roll angles with increasing load height

Возможные отклонения поведения модели от реального БТС могут заключаться в отсутствии учёта пробуксовки колёс и скольжения БТС по наклонным поверхностям в боковом направлении, что не критично для исследования штатных режимов работы. Углы Эйлера меняются в соответствии с изменением рельефа поверхности, а увеличение высоты груза ожидаемо влечет увеличение амплитуды углов тангажа и крена. Модель показывает сравнительно высокое значение скорости работы при движении по заданной пространственной карте, что позволяет использовать вычислительные ресурсы на алгоритмы моделирования показаний системы навигации, например ГНСС и лидаров [29].

Вывод. В работе представлена математическая модель динамики БТС с двумя поворотными осями, предназначенная для разработки и отладки алгоритмов автономного управления. Предложенная модель учитывает особенности движения БТС в условиях карьера, включая трёхмерное перемещение ЦМ, динамику подвески, пространственное вращение корпуса, а также влияние уклонов на угловые параметры - тангаж и крен. Особое внимание уделено эффектам, связанным с отрывом колёс от опорной поверхности.

Одним из важных элементов модели является аналитический метод расчёта моментов инерции, учитывающий массогабаритные параметры БТС, положение кузова и уровень загрузки. Это позволяет адаптировать модель под различные эксплуатационные условия без необходимости привлечения сложных численных методов или экспериментальных данных. Несмотря на введённые упрощения, такие как отсутствие модели вращения колёс, упрощённое описание контакта шин с дорогой и отсутствие детального моделирования силовой установки и рулевых приводов - модель сохраняет достаточную физическую достоверность и согласована по входам и выходам с реальными БТС. Это делает её эффективным инструментом для отладки алгоритмов управления.

Таким образом, разработанная модель представляет сбалансированное решение, сочетающее адекватность, вычислительную эффективность и применимость в задачах проектирования автономных транспортных систем для закрытых промышленных территорий.

Библиографический список:

1. Распоряжение Правительства РФ от 27 ноября 2021 г. № 3363-р «О Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202112030006> (дата обращения: 07.08.2025). Приложение 10: Уровни автономности транспортных средств.
2. <https://www.vinnova.se/globalassets/mikrosajter/ffi/dokument/slutrapporter-ffi/cyklar-och-andra-fordon-rapporter/2021-04347engelska.pdf> (дата обращения: 05.04.2025). Wendin C., Wilhelmsson M., Melén C.T. и др. ASPECT – A System for Electric and Connected Transport Solution: public report [Электронный ресурс]. 2024.
3. Котиев Г.О., Дьяков А.С. Метод разработки ходовых систем высокоподвижных безэкипажных наземных транспортных средств // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 1. С. 186-197.
4. Вассуф Я. Развитие беспилотных транспортных средств: проблемы экономики, управления, математического моделирования // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2023. №191. С.115-137. DOI:10.21515/1990-4665-191-021.
5. Гусейнов Р.В., Дадаева П.А., Шабазов М.М., Муталибов М.Т., Ахмедова М.Р. Особенности математического моделирования безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(1):61-67. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-1-61-67>
6. Баламирзоев А.Г., Салахов А.З., Селимханов Д.Н. Математическое моделирование движения автотранспорта и пешеходов на нерегулируемых перекрестках. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(2):44-52. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-2-44-52>
7. Ле В.Н. Продольная динамическая модель полноприводного автомобиля / Ван Нгиа Ле, Хоанг Фук Дам, Ван Фыонг Динь // Автотракторостроение и автомобильный транспорт : сборник научных трудов : в 2 томах / Белорусский национальный технический университет, Автотракторный факультет ; редкол.: Д. В. Капский, А. С. Поварехо (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2024. – Т. 1. – С. 30-37.
8. Яицков И.А., Поляков П.А. Продольная динамика транспортного средства при торможении // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. №10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prodolnaya-dinamika-transportnogo-sredstva-pri-tormozhenii> (дата обращения: 27.08.2025).
9. Dębowski A., Faryński J.J., Żardecki D.P. The bicycle model of a 4WS car lateral dynamics for lane change controller // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2022;1(1247):012021.
10. Wong J.Y. Theory of Ground Vehicles. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2001;528. ISBN 0-471-35461-9.
11. Pacejka H.B., Bakker E. The magic Formula Tyre Model. Proc. 1st International Tyre Colloquium. 1991:1-18.
12. Gao L., Dong Y., Zhao J. Dynamic Modeling and Characteristic Analysis of Articulated Steering Vehicles // Applied Sciences. 2023. № 8 (13). С. 5099.
13. Guzzella L. Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization. 3rd ed. Berlin; Heidelberg: Springer, 2013. XVI, 412 p. (Springer Series in Advanced Manufacturing). ISBN 978-3-642-35912-5. DOI: 10.1007/978-3-642-35913-2.
14. Строганов В.И., Сидоров К.М. Математическое моделирование основных компонентов силовых установок электромобилей и автомобилей с КЭУ : учеб. Пособие. М.: МАДИ. 2015. 100 с.
15. Minaker B. Modelling the dynamics of a vehicle with active geometry suspension // The Dynamics of Vehicles on Roads and on Tracks: proceedings of the 26th International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks (DyVehRoads 2019), August 12-16, 2019, Gothenburg, Sweden / ed. by R. Fröhling. Leiden: CRC Press/Balkema, 2021. P. 716-727.
16. Narendra M. A., Huzefa S. M., Bobere Prof. F. Mathematical Modelling and Simulation of Suspension System in MATLAB/SIMULINK // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. 2022. № 6 (10). С. 145–179.
17. Cheng L. Dynamic modeling and simulation of mining truck // 2022 4th International Academic Exchange Conference on Science and Technology Innovation (IAECST). 2022. P. 318-321. DOI: 10.1109/IAECST57965.2022.10062151.
18. Котиев Г.О., Горелов В.А., Бекетов А.А. Математическая модель движения вездеходного транспортного средства // Журнал автомобильных инженеров. 2008. № 1. С. 50 – 54.
19. Лебедев А.А. Динамика полета беспилотных летательных аппаратов: учебное пособие / А.А. Лебедев, Л.С. Чернобровкин; под ред. А.А. Лебедева. Москва: Машиностроение, 1973. 616 с.
20. Spentzas K. Kinematics of four-wheel-steering vehicles // Forschung im Ingenieurwesen. 2001. V. 66. P. 211-216. DOI: 10.1007/s100100100060.

21. Gillespie T.D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale: SAE International, 1992. 400 p. ISBN 1-56091-199-9.
22. Jazar R.N. Vehicle Dynamics: Theory and Application. 2nd ed. New York: Springer, 2014. XXII, 1066 p. (Springer Series in Advanced Manufacturing). ISBN 978-1-4614-8544-5. DOI:10.1007/978-1-4614-8544-5.
23. Pacejka H.B. Tire and Vehicle Dynamics. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012. 672 p. ISBN 978-0-08-097016-5.
24. Маркеев А.П. Теоретическая механика: учебник для университетов. 3-е изд., испр. Москва; Ижевск: Изд-во Научно-издательского центра "Регулярная и хаотическая динамика", 2001. 591 с. Библиогр.: с. 582. ISBN 5-93972-088-9.
25. Бухгольц Н.Н. Основной курс теоретической механики. Часть 2. Динамика системы материальных точек: учебное пособие для СПО. 3-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 2025. 336 с. ISBN 978-5-507-52520-1. URL: <https://e.lanbook.com/book/454238> (дата обращения: 07.08.2025).
26. Craig J.J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. Moscow; Izhevsk: Insti-tute of Computer Research, 2013. 564 p. (Dynamic Systems and Robotics). ISBN 978-5-4344-0164-7.
27. Голубев Ю.Ф. Основы теоретической механики. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 2000. 720 с.
28. Вахламов В.К. Конструкция, расчет и эксплуатационные свойства автомобилей: учеб. пособие для вузов. Москва: Академия, 2009. 557 с. ISBN 978-5-7695-6608-0.
29. Лобачев И.В., Масленников А.Л. Моделирование работы двухмерного лидара для применения в задачах управления движением наземных транспортных средств в карьере // XLVIII Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых - пионеров освоения космического пространства "Королевские чтения": Сборник тезисов. Москва, 23-26 января 2024. Изд. МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2024. Т. 2. С. 514-517.
30. Лобачев И.В., Масленников А.Л., Пчелинцев В.Э. Алгоритм формирования трассы для имитационной модели движения карьерного транспортного средства // Автоматизация. Современные технологии. 2024, т. 78, № 4, с. 152–157. DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-4-152-157.

References:

1. Order of the Government of the Russian Federation dated November 27, 2021 No. 3363-r "On the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period until 2035" [Electronic resource]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202112030006> (accessed: 07.08.2025). Appendix 10: "Levels of autonomy of transport vehicles". (In Russ)
2. <https://www.vinnova.se/globalassets/mikrosajter/ffi/dokument/slutrappporter-ffi/cyklar-och-andra-fordon-rappporter/2021-04347engelska.pdf> (accessed: 05.04.2025). Wendin C., Wilhelmsson M., Melén C.T. и др. ASPECT – A System for Electric and Connected Transport Solution: public report [Electronic resource]. 2024.:
3. Kotiev G.O., Dyakov A.S. Method of developing running systems for highly mobile crewless ground vehicles. *Izvestiya SFU. Engineering Sciences*. 2016;1:186-197. (In Russ)
4. Vassuf Ya. Development of unmanned vehicles: economic, management and mathematical modeling problems. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2023;191:115-137. DOI: 10.21515/1990-4665-191-021. (In Russ)
5. Guseinov R.V., Dadaeva P.A., Shabazov M.M., Mutalibov M.T., Akhmedova M.R. Features of mathematical modeling of road safety on highways. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2024;51(1):61-67. (In Russ.) <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-1-61-67> (In Russ)
6. Balamirzoev A.G., Salakhov A.Z., Selimkhanov D.N. Mathematical modeling of the movement of vehicles and pedestrians at unregulated intersections. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2024;51(2):44-52. (In Russ.) <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-2-44-52> (In Russ)
7. Le V.N., Dam H.F., Dinh V.F. Longitudinal dynamic model of all-wheel drive vehicle//Automotive Engineering and Automobile Transport: proceedings of scientific works in 2 volumes / Belarusian National Technical University, Automotive Faculty; ed. by D.V. Kapsky, A.S. Povarekho (ed.) Minsk: BNTU, 2024;1:30-37.
8. Yaitkov I.A., Polyakov P.A. Longitudinal dynamics of a vehicle under braking. *Izvestiya Tulkogo Gosudarstvennogo Universiteta. Technical Sciences*. 2022;10. <https://cyberleninka.ru/article/n/prodolnaya-dinamika-transportnogo-sredstva-pri-tormozhenii> (accessed: 27.08.2025). (In Russ)
9. Dębowski A., Faryński J.J., Żardecki D.P. The bicycle model of a 4WS car lateral dynamics for lane change controller. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2022;1(1247): 012021.
10. Wong J.Y. Theory of Ground Vehicles. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2001; 528. ISBN 0-471-35461-9.
11. Pacejka H.B., Bakker E. The magic Formula Tyre Model // Proc. 1st International Tyre Colloquium. 1991: PP. 1-18.
12. Gao L., Dong Y., Zhao J. Dynamic Modeling and Characteristic Analysis of Articulated Steering Vehicles *Applied Sciences*. 2023;8 (13):5099.
13. Guzzella L. Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization. 3rd ed. Berlin; Heidelberg: Springer, 2013; XVI, 412 p. (Springer Series in Advanced Manufacturing). ISBN 978-3-642-35912-5. DOI: 10.1007/978-3-642-35913-2.
14. Stroganov V.I., Sidorov K.M. Mathematical modeling of main components of power plants for electric vehicles and vehicles with KEU: study guide. Moscow: MADI, 2015; 100 p. (In Russ)

15. Minaker B. Modelling the dynamics of a vehicle with active geometry suspension // The Dynamics of Vehicles on Roads and on Tracks: proceedings of the 26th International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks (DyVehRoads 2019), August 12-16, 2019, Gothenburg, Sweden / ed. by R. Fröhling. Leiden: CRC Press/Balkema, 2021; 716-727.
16. Narendra M.A., Huzefa S.M., Bobere Prof. F. Mathematical Modelling and Simulation of Suspension System in MATLAB/SIMULINK. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2022;6 (10):145–179.
17. Cheng L. Dynamic modeling and simulation of mining truck // 2022 4th International Academic Exchange Conference on Science and Technology Innovation (IAECST). 2022;318-321. DOI: 10.1109/IAECST57965.2022.10062151.
18. Kotiev G.O., Gorelov V.A., Beketov A.A. Mathematical model of off-road vehicle movement. *Journal of Automotive Engineers*. 2008;1:50-54. (In Russ)
19. Lebedev A.A., Chernobrovkin L.S. Flight dynamics of unmanned aerial vehicles: study guide / ed. by A.A. Lebedev. Moscow: Mashinostroenie, 1973; 616 p. (In Russ)
20. Spentzas K. Kinematics of four-wheel-steering vehicles. *Forschung im Ingenieurwesen*. 2001; 66: 211-216. DOI: 10.1007/s100100100060.
21. Gillespie T.D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale: SAE International, 1992;400 p. ISBN 1-56091-199-9.
22. Jazar R.N. Vehicle Dynamics: Theory and Application. 2nd ed. New York: Springer, 2014; XXII, 1066 p. (Springer Series in Advanced Manufacturing). ISBN 978-1-4614-8544-5. DOI:10.1007/978-1-4614-8544-5.
23. Pacejka H.B. Tire and Vehicle Dynamics. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012;672 p. ISBN 978-0-08-097016-5.
24. Markeev A.P. Theoretical mechanics: textbook for universities. 3rd ed., revised. Moscow; Izhevsk: Publishing House of Scientific and Publishing Center "Regular and Chaotic Dynamics", 2001;591 p. Bibliogr.: p. 582. ISBN 5-93972-088-9. (In Russ)
25. Bukhgalts N.N. Basic course of theoretical mechanics. Part 2. Dynamics of a system of material points: study guide for vocational education. 3rd ed., revised. St. Petersburg: Lan', 2025. 336 p. ISBN 978-5-507-52520-1. URL: <https://e.lanbook.com/book/454238> (accessed: 07.08.2025). (In Russ)
26. Craig J.J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. Moscow; Izhevsk: Institute of Computer Research, 2013;564 p. (Dynamic Systems and Robotics). ISBN 978-5-4344-0164-7.
27. Golubev Yu.F. Fundamentals of theoretical mechanics. Moscow: Moscow University Press, 2000.720 p. (In Russ)
28. Vakhlamov V.K. Construction, calculation and operational properties of automobiles: study guide for universities. Moscow: Akademiia, 2009;557 p. ISBN 978-5-7695-6608-0. (In Russ)
29. Lobachev I.V., Maslennikov A.L. Modeling the operation of a two-dimensional lidar for application in the control of ground vehicle movement in open-pit mining // XLVIII Academic Readings on Cosmonautics Dedicated to the Memory of Academician S.P. Korolev and Other Prominent Russian Scientists - Pioneers of Space Exploration "Korolev Readings": Proceedings. Moscow, January 23-26, 2024. Bauman Moscow State Technical University Publishing, 2024; 2:514-517. (In Russ)
30. Lobachev I.V., Maslennikov A.L., Pchelintsev V.E. An algorithm for forming a route for a simulation model of the movement of a quarry vehicle. *Automation. Modern Technologies. Innovative Mashinostroenie Publishing*, 2024;152–157. (In Russ)

Сведения об авторах:

Лобачев Иван Витальевич, аспирант, старший преподаватель кафедры ИУ1 «Системы автоматического управления»; lobivit@bmstu.ru; ORCID 0009-0009-2744-8685

Маслеников Андрей Леонидович, старший преподаватель кафедры ИУ1 «Системы автоматического управления»; amas@bmstu.ru; ORCID 0000-0001-9061-4193

Information about authors:

Ivan V. Lobachev, Postgraduate Student, Senior lecturer, Department of IU1 "Automatic Control Systems"; lobivit@bmstu.ru; ORCID 0009-0009-2744-8685

Andrey L. Maslennikov, Senior lecturer, Department of IU1 "Automatic Control Systems"; amas@bmstu.ru; ORCID 0000-0001-9061-4193

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 07.10.2025.

Одобрена после рецензирования/Revised 19.11.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 15.01.2026.

Модернизация системы обеспечения информационной безопасности ситуационного центра, являющегося объектом критической информационной инфраструктуры

И.А. Лоскутов^{1,2,3}, В.А. Репенко⁴

¹Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы имени А.Г. Иосифьяна»

(АО Корпорация «ВНИИЭМ»),

¹107078, г. Москва, ул. Вольная, 30, стр. 10, Россия,

²Колледж экономики, права и информационных технологий,

²109029, г. Москва, ул. Нижегородская, 32, стр.16, Россия,

³МИРЭА - Российский технологический университет,

³119454, г. Москва, проспект Вернадского, 78, стр.4, Россия,

⁴Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

⁴115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является повышение защищенности ситуационного центра, являющегося объектом критической информационной инфраструктуры. **Метод.** Методы научного познания, использованные при написании работы: систематизация, анализ, описание. **Результат.** Определена модель ситуационного центра, сформирована модель угроз. Предложены четыре подхода по определению значимости защиты от разных видов кибератак, сформированы рекомендации по защите. **Вывод.** Полученные в работе результаты не только структурируют информацию по вопросам обеспечения информационной безопасности ситуационного центра, но и пытаются математически описать закономерности ее модернизации, что может стать базисом для дальнейших исследований, как по направлению исследования, так и в смежных областях.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, информационная безопасность, ситуационный центр, критическая информационная инфраструктура, система защиты информации, угрозы

Для цитирования: И.А. Лоскутов, В.А. Репенко. Модернизация системы обеспечения информационной безопасности ситуационного центра, являющегося объектом критической информационной инфраструктуры. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(1):139-150. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-139-150.

Modernization of the information security system of the situational center, which is a critical information infrastructure facility

I.A. Loskutov^{1,2,3}, V. A. Repenko⁴

¹A.G. Iosifian' Joint Company 'Research and Production Corporation "Space Monitoring Systems, information management and electromechanical complexes",

¹30 Volnaya St., p. 10, Moscow 107078, Russia,

²College of Economics, Law and Information Technology,

²32 Nizhegorodskaya St., build.16, Moscow 109029, Russia,

³MIREA - Russian Technological University,

³78, Vernadsky Ave., build.4, Moscow 119454, Russia,

⁴National Research Nuclear University MEPhI,

⁴31 Kashirskoe highway, Moscow 115409, Russia

Abstract. Objective. The purpose of this study is to improve the security of a situation center, which is part of critical information infrastructure. **Method.** The research methods used in

writing this paper include systematization, analysis, and description. **Result.** A situation center model has been defined, and a threat model has been developed. Four approaches to determining the importance of protection against various types of cyberattacks are proposed, and recommendations for protection are developed. **Conclusion.** The results obtained in the work not only structure information on issues of ensuring information security of the situation center, but also attempt to mathematically describe the patterns of its modernization, which can become the basis for further research, both in the direction of the study and in related fields.

Keywords: unmanned aerial vehicles, information security, situation center, critical information infrastructure, information security system, threats

For citation: I.A. Loskutov, V.A. Repenko. Modernization of the information security system of the situational center, which is a critical information infrastructure facility. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):139-150. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-139-150.

Введение. XXI век породил множество киберугроз, а также способов их доставки до атакуемого объекта. Кроме того, в последние десятилетия постоянно растет количество и виды кибернападений на предприятия [1] с целью получения несанкционированного доступа (НСД) к их коммерческой тайне и иных важных сведений о персонале [2]. Особенно данная выкладка важна для относящихся к категории критической информационной инфраструктуры (КИИ). Для осуществления планов злоумышленников, в последнее время начало набирать популярность использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [3]. Именно их массовое производство и относительно низкая цена [4] позволили приспособить с виду безобидные устройства для атак на автоматизированные информационные системы (АИС). Преимущества данного вида механизмов для злоумышленников очевидны – вследствие их относительно малого размера, появляется возможность незаметно проникнуть в контролируемую зону и начать проводить компьютерную атаку (КА). Именно поэтому, вопрос об обеспечении информационной безопасности (ИБ) объектов КИИ от малых летательных аппаратов (ЛА), несущих злонамеренное воздействие все более стал волновать специалистов по защите информации (ЗИ) [5].

Важно отметить, что, как и в случае с обычными КА, применение БПЛА в редких случаях проводится спонтанно [6], нарушители ИБ достаточно хорошо знают территорию объекта, а также примерное расположение наиболее значимых мест скопления важной информации и принятия решения (серверные, зоны управления и т.п.).

Постановка задачи. На предприятии значимую роль играет ситуационный центр (СЦ) [7]. Именно он становится одной из приоритетных целей КА, вследствие особенностей обрабатываемой там информации. Исследование вопросов по ЗИ для данного объекта априори становится актуальным. Поскольку редко используется определение ситуационного центра, предварительно покажем в общих чертах основные характеристики. В соответствии с [8] под СЦ следует понимать объединение технических средств и программных продуктов (ПП), направленное на поддержание стабильности бизнес-процессов предприятия, а также обеспечение лаконичного внутреннего взаимодействия связанных с ним элементов предприятия. Однако в данном определении плохо раскрыты некоторые аспекты работы СЦ. Для уточнения информации обратимся к работе [9]. Именно в ней конкретизируется вариативность исполнений, которая условно делится на три группы, рис. 1.



Рис. 1 – Виды ситуационных центров
Fig. 1 – Types of situation centers

Отмеченная вариативность сделана с учетом влияния информационных технологий на внутренние процессы предприятия и СЦ, т.е. на степень их взаимодействия с АИС. В целом же, архитектурная модель СЦ будет усредненно похожа на рассмотренное в работе [9] для МЧС России, рис. 2. Именно ее и будем принимать в качестве объекта ЗИ.

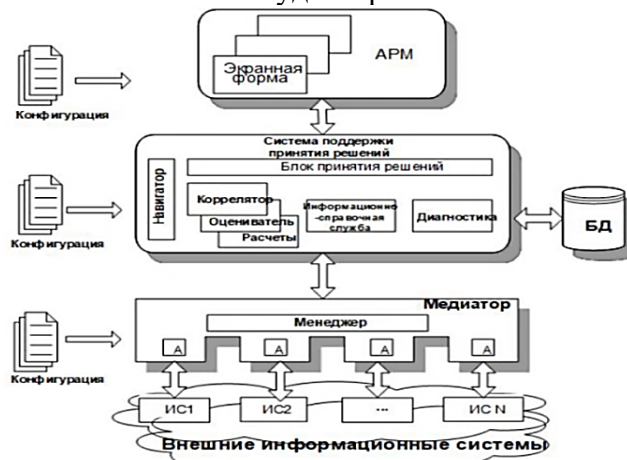


Рис. 2 – Обобщенная архитектурная модель ситуационного центра

Fig. 2 – Generalized architectural model of the situation center

На рис. 2 под АРМ понимается автоматизированное рабочее место, под БД – база данных, под ИС – информационная система. С точки зрения необходимых элементов, на основании показанной схемы, рис. 2 и сведений из [10], компонентный состав будет соответствовать рис. 3.



Рис. 3 – Компонентный состав ситуационного центра

Fig. 3 – Component composition of the situation center

Организация СЦ будет сегментирована по частям, рис.4.

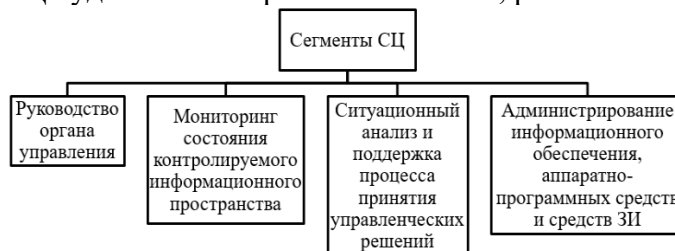


Рис. 4 – Сегментация ситуационного центра

Fig. 4 – Segmentation of the situation center

Наибольший интерес для данной работы представляет последний элемент, т.к. в нем упоминаются средства ЗИ (СЗИ), априори необходимые для обеспечения должного уровня ИБ.

Методы исследования. Проанализируем применяемую систему обеспечения информационной безопасности (СОИБ). Обратимся к научной работе [10], т.к. в ней показана интересная схема взаимодействия компонентов с СЗИ, рис. 5. На рис. 5 показаны элементы, необходимые для обеспечения должного уровня ИБ – определены модель нарушителя, модель угроз, политика. Примем данную логику взаимодействия за основу. Далее опишем необходимые требования для СОИБ [11]: использовать передовые технологии; не выходить за рамки, оговоренные законодательными актами России; архитектура построения – иерархическая; применение наиболее эффективных средств борьбы с кибернарушителями. Поскольку логика построения безопасных информационных сред в целом известна,

примем, что в СЦ изначально установлены наиболее актуальные ПП, обеспечивающие должный уровень ЗИ.

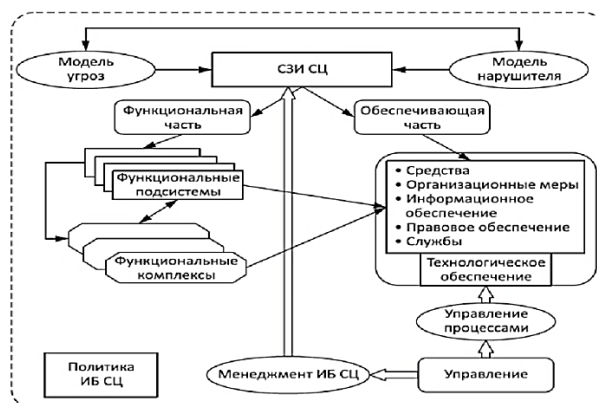


Рис. 5 – Схема взаимодействия СЗИ

Fig. 5 – Scheme of interaction of information security system

Отметим, что в системе установлена не отечественная операционная система (ОС) Windows Server, что вызывает рациональное пожелание о замене на одну из перечисленные в работе [12]. В аппаратной части необходимо отметить современные тенденции по переходу на отечественное оборудование, вследствие прекращения поставок иностранными компаниями [13], да и в целом политики ФСТЭК России, направленной на прекращение их лицензирования [14].

Имеется явная потребность в обновлении аппаратной части СОИБ. В части обеспечения ЗИ, как показывает практика, наиболее актуальной угрозой становится применение малых ЛА. Поскольку вопрос об ИБ в данном ключе актуален и мало предприятий на данный момент времени обладают системой защиты от них – примем, что ее у рассматриваемого СЦ нет. Соответственно, необходимо оценить способы получения информации при помощи БПЛА, которые в дальнейшем и будут парироваться СОИБ.

1) Расположение СЦ. Как показывает практика, многие СЦ предприятия мало заботятся о физической защите информации, о чем свидетельствует, например, работа [15]. И, если даже исключить вариант непосредственного подключения со стороны улицы, то все равно представляется возможность считать информацию с того же БПЛА, непосредственно находящегося вблизи коммуникаций.

2) Верхняя полусфера. О защите данной территории стали активно говорить в последнее время, как и о способах борьбы, пример – работа [16].

3) Для обеспечения должного уровня защиты необходимо использовать специальные комплексы аппаратно-программных средств, которые не установлены около помещения СЦ и на периметре предприятия.

4) Перехват данных, передаваемых по беспроводным технологиям. В данном случае уже имеются прецеденты, когда БПЛА подключался извне к внутренней WiFi системе и начинал перехват данных [17]. Таким образом, необходимо учитывать особенности распространения беспроводного сигнала на территории производства.

5) Злонамеренное падение. На данный момент времени не было найдено упоминания подобного применения БПЛА, хотя, безусловно, она уже была использована. Суть – активация встроенных функций аварийной посадки. Логика будет во многом похожа на отмеченные в патентной разработке [18]. В данном случае понимается медленный спуск на территорию предприятия даже при условии прерывания управления с помощью спецсредств. Ключевой особенностью станет тот факт, что после приземления, устройство все также может начать в автономном режиме подключаться к сети предприятия, а далее уже к СЦ и передавать наружу необходимые для злоумышленника сведения. Для защиты от угрозы, необходимо применять специальные технологии, не допускающие подобных планирования (что сложно реализовать) или использовать системы активной защиты

и шумогенераторы на крышах и иных возвышенностях в постоянно включенном режиме (что вполне реализуемо).

6) Подрезка информационного кабеля. Нередко инфокоммуникационное оборудование находится на верхних этажах, в которое БПЛА может залететь и осуществить непосредственное физическое подключение. Необходимо обеспечить защиту подобных помещений от стороннего проникновения, особенно извне здания.

7) Использование дрона как доставщика скаченной из АИС информации. В данном случае необходимо обеспечить невозможность физической передачи флешкарт и т.п. накопителей информации, как и проводить анализ поведения сотрудников с целью выявления потенциальных угроз, исходящих из них, особенно администраторов.

Можно констатировать о выявлении проблем СЦ, которые необходимо решить.

Составим подробную модель угроз для ситуационного центра предприятия, на котором он располагается. Модель угроз формируется на основании нормативно-правовых актов России и органа власти – ФСТЭК России. Наиболее подробно указана в Методическом документе от 2021 года [19], на него и будем далее опираться при моделировании потенциальных угроз СЦ. Первое на что следует обратить внимание – определение возможного нарушителя ИБ и его разделение по месту атаки (изнутри предприятия или снаружи). Деление нарушителей ИБ на внешних и внутренних показано на рис. 6. Следующим этапом станет их разграничение по уровням возможностей. Из [20] следует, что они подразделяются на $H_1 \dots H_4$.

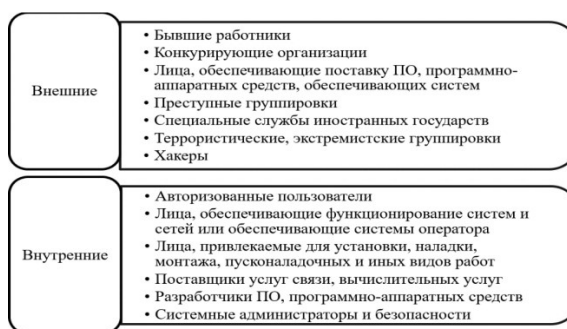


Рис. 6 – Возможные нарушители ИБ
Fig. 6 – Potential information security violators

Бывшие работники, безусловно, могут оказать негативные действия против АИС. Их знания расположения оборудования, основных узлов и точек подключения будут играть значительную роль при автономном подключении к СЦ. Уровень H_1 .

Конкурирующие организации – поскольку СЦ принадлежит предприятию и обрабатывает значимые информационные ресурсы, нанимателями операторов дронов или же пилотами могут в большей вероятности стать сотрудники данных компаний. Уровень H_1 .

Лица, поставляющие ПП, маловероятно станут атакующими, тем более с применением БПЛА. Причина первая – вредоносную программу можно установить непосредственно в код поставляемого ПО, применение малых ЛА в данном случае скорее станет редким исключением, его применение будет только в виде получателя информации, достаточно смутная перспектива. Причина вторая – выбор устанавливающих ПП на СЦ предприятиях. Выбор иметь СЦ будет ограничен только зарекомендовавшими себя фирмами, репутация которых будет многократно выше выигрыша от продажи полученной информации. Уровень не имеет значения.

Преступные группировки – возможные нарушители ИБ СЦ предприятия. Причины для их атак предостаточно – как самореализация и утверждение в обществе, так и получение материальной выгоды, например, при исполнении заказа от конкурирующей организации. Уровень H_2 .

Специальные службы иностранных государств. Крайне маловероятная угроза, т.к. рассматриваемый СЦ не обрабатывает информацию типа «гостайна». Уровень не имеет значения.

Террористы. Аналогично предыдущему. Частные компании крайне редко подвергаются атакам террористов, кроме того целенаправленность их потенциальной КА мало связана с бизнес-процессами и т.п. информацией, обрабатываемой в СЦ. Сущность их действий хорошо показана в работе [21]. Уровень не имеет значения.

Хакеры, безусловно, будут являться потенциальными злоумышленниками. Как верно подмечено в базе данных ФСТЭК России, их основная цель это самореализация и финансовая выгода. Применение БПЛА для КА достаточно необычный способ киберпроникновения в серверное пространство, связанное с СЦ. Уровень H_1 .

Пользователи внутренней АИС не рационально причислять к потенциальным атакующим, т.к. применение БПЛА для них абсолютно нерациональное действие, исключение – использование его как контейнера, однако вероятность быть раскрытым слишком велика. Уровень не имеет значения.

Лица, обеспечивающие функционирование АИС аналогично предыдущему, не будут отнесены к категории потенциальных нарушителей. Уровень не имеет значения.

Установщики ПП и наладчики маловероятно будут атаковать АИС с применением БПЛА, т.к. существует много других более рациональных способов получить доступ изнутри. Уровень не имеет значения.

Поставщики услуг связи. Данные лица нерационально считать злоумышленниками, т.к. обычно соискатели на подобные должности проходят достаточно жесткий контроль, нередко применяются даже полиграф. Кроме того, применение БПЛА для потенциальной атаки данными сотрудниками также неоправданно. Уровень не имеет значения.

Разработчики ПО и программных средств – аналогично предыдущему. Уровень не имеет значения.

Системные администраторы и безопасности. Данные индивиды будут являться потенциальными нарушителями. Причина кроется в их возможности работать напрямую с системами ЗИ, применяемыми внутри АИС. Поведение атаки с их участием можно смоделировать следующим образом: партнер снаружи запускает дрон и подводит максимально близко к слепой зоне систем ИБ СЦ предприятия. Системные администраторы отключает частично защиту, отправляя ее на «штатную перезагрузку». В этот момент по полученной от него схеме – оператор дрона подсоединяется к серверным компонентам, скачивает информацию и улетает. Уровень H_2 . Сведем в табл. 1 полученные сведения.

Таблица 1. Характеристика нарушителей ИБ
Table 1. Characteristics of information security violators

Проникновение Penetration	Нарушитель Intruder	Уровень Level
Внешнее External	Бывшие работники Former employees	H_1
	Конкурирующие организации Competing organizations	
	Хакеры Hackers	
Внутренние Internal	Преступные группировки Criminal groups	H_2
	Системные администраторы и безопасности System administrators and security administrators	

Из табл. 1 следует, что максимальный уровень возможностей у потенциальных нарушителей H_2 , и останется таким же даже в случае сговора нескольких из представленных. Следующим этапом следует оценить потенциальный ущерб АИС и СЦ. В данном случае это будут U_1 , U_2 и U_3 . Т.е. ущерб физическим лицам из-за утечки их конфиденциальных и персональных данных; проблемы у юридического лица, повлекшие дополнительные материальные затраты; а также нарушение законов. Вне зависимости от способа подключения к АИС СЦ предприятия, способы в целом, останутся одинаковыми.

На рис. 7 представлены способы реализации угроз ИБ. Остановимся на определении угроз, свойственных АИС СЦ предприятия. В первом случае важно показать их характер: непреднамеренные / преднамеренные; неатропогенные; утечка по техническим каналам. Во втором случае, соотнесение шифра.

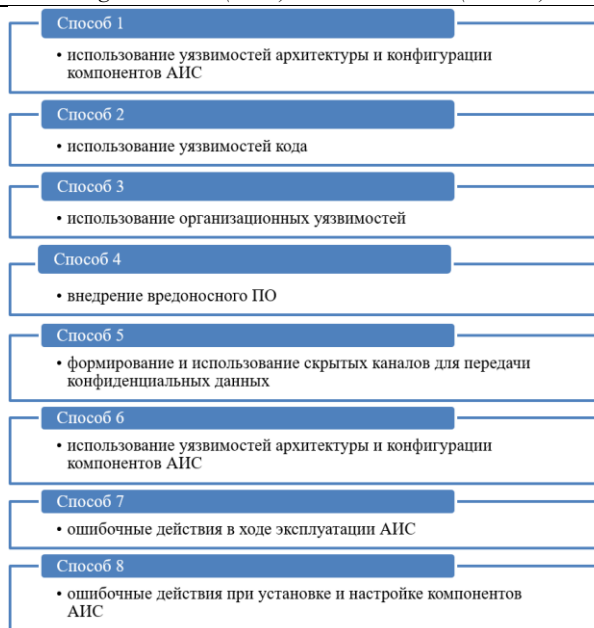


Рис. 7 – Способы реализации угроз ИБ

Fig. 7 – Methods of implementing information security threats

Применительно к рассматриваемому объекту это будут:

У.П.1, 3-6; У.П.1.2-1.9; У.П.2.1-2.13; У.П.3.1-3.7, 3.9; У.П.4.1-4.9; У.П.5.1-5.6.

Более подробно о вариациях угроз показано на уже упомянутом портале базы данных угроз ФСТЭК России, а также на [22], который дублирует информацию, так и обеспечивает более удобный способ навигации по базе, которая на данный момент плохо реализована на головном сайте.

Обсуждение результатов. В целом, были описаны все самые значимые элементы, свойственные модели угроз и можно однозначно сказать о ее завершенности. Отдельным моментом следует указать возможности математической реализации определенных частей модели угроз, особенно с учетом применимости БПЛА. В данном случае из-за отсутствия явной статистики по КА на СЦ и иные элементы предприятий можно вывести предварительную математическую формулу, которую в дальнейшем можно будет реализовать при создании модели угроз. Наиболее оправданным в данном случае следует считать:

1) Подход по определению вероятности возникновения КА на СЦ предприятия в целом посредством применения БПЛА. Как известно, среди КА наиболее распространено порядка сотни видов, в некоторых источниках пытаются указать более конкретную цифру. Так, например, в статье [23] говорится о 54 наиболее часто встречающихся. Однако, в любом случае, зависимость в первом приближении будет следующей:

$$P_{КА_БПЛА} = 1 / N$$

где: $P_{КА_БПЛА}$ – вероятность возникновения КА посредством БПЛА; N – количество известных КА.

Важно отметить, что подобный подход крайне грубый и принимает равнозначность видов атак, что, разумеется есть частный случай. Другое дело, если провести видоизменение матаппарата. В данном случае зависимость приобретет следующий вид:

$$P_{КА_БПЛА} = 1 - \sum_{k=1}^{N-1} P_i.$$

где: P_i – вероятность возникновения КА.

Рассчитать вероятность подобным образом намного проще, т.к. достаточно много компаний публикуют количественные показатели КА. Более того, именно такой путь на данный момент представляет возможным хоть как-то определить число проведенных атак с малых ЛА.

2) Подход поиска вероятности успешности КА. Для поиска вероятности успешности атаки следует проанализировать возможные способы проникновения. В частности, для атак с БПЛА они будут: подключение к беспроводной сети цели, использование технических

каналов, удаленная подрезка к сетевому кабелю и т.п. Уравнение в данном случае будет вида:

$$P_{\text{УСП_КА_БПЛА}} = 1 / L \times S_j$$

где: $P_{\text{УСП_КА_БПЛА}}$ – вероятность успешности определенного способа КА; L – количество вариаций КА; S_j – вероятность состояний.

Под вероятностью состояний понимается один из сценариев. Как пример, можно рассматривать все виды защитных действий, а можно учитывать вероятностный характер, так как уравнение верхнего уровня, внутренние множители могут быть коррелированы, что создаст дополнительный стимул развития направления.

3) Подход поиска усредненной вероятности возникновения КА на конкретном СЦ предприятии. Данный подход будет основан на определении вероятности КА при учете его характеристических особенностей, которые могут заинтересовать потенциальных злоумышленников. В простом случае это будет соотношение выявленных КА за период. Т.е. уравнение станет вида:

$$P_{\text{ШАНС_КА}} = M / C$$

где: $P_{\text{ШАНС_КА}}$ – вероятность возникновения КА на производстве; M – количество выявленных КА на СЦ предприятия за период времени; C – количество КА за период.

4) Подход определения среднеквадратичной суммы потерь СЦ предприятий посредством КА с БПЛА. Для оценки среднеквадратичных потерь следует вывести зависимость, связанную с общей стоимостью утраченных финансов, т.е.:

$$P_r = 1 / N_{\text{П}} \times P_{\text{ПТЕРЬ}}$$

где: $N_{\text{П}}$ – количество предприятий за исследуемый период; $P_{\text{ПТЕРЬ}}$ – общее количество финансовых потерь.

Данное уравнение наиболее полезно также и при определении суммы страхования, т.к. она может применяться как показатель для распределения потерь

С целью обеспечения должного уровня безопасности СЦ необходимо учесть вышеозвученные проблемы и найти оптимальные на них решения. Более того, с учетом отсутствия в чистом виде регулирующих нормативно-правовых актов по направлению, примененные подходы можно будет использовать при разработке соответствующих документов. Предварительно важно учесть финансовую составляющую, играющую немаловажную роль при учете потенциальных потерь. Для этого проведем оценку стоимости СЦ. В целом, стоимость СЦ будет напрямую зависеть от количества и значимости информации, поступающей в нее. Так как при расчете бралась концептуальная модель предприятия, можно принять ее как долю от общей выручки компании. Так как имеется деление на принадлежность к компании к малому / среднему / крупному бизнесу [24], то посчитаем что стоимость фирмы будет составлять 1,4 млрд. руб. Так как общесуммарный доход будет превышать потери от разрушения СЦ, примем что максимальное пагубное влияние выльется в 40%, по причине автономной работы на низких оборотах предприятия, что следует из правил расчета критических значений, свойственных организации производства. Максимальная потеря составит 1,4 млрд руб. $\times 0.4 = 0,56$ млрд. руб.

Покажем предложения по улучшению СОИБ и рассчитаем уже выигрыш от применения защитных мер. Первое на что следует обратить внимание – предустановленное программное обеспечение. Как уже было сказано ранее, в СЦ применяются иностранные ПП. Соответственно и изменения должны их касаться. Среди ОС оправдан выбор между UNIX – системами. Хорошим примером можно считать ATSR Linux, разработанную НПО «РУСБИТЕХ» [25]. Об оправданности выбора также говорит и распространяемая информация на отмеченном сайте производителя, рис. 8. В поддержку данного ПП выступает и банк угроз ФСТЭК России, который ясно дает понять о практически полном отсутствии угроз от КА, в отличие от всех известных систем компании Microsoft, которая даже на последней версии насчитывает свыше десятка.



Рис. 8 – Оборудование для установки отечественной ОС ASTRA LINUX
Fig. 8 – Equipment for installing the domestic ASTRA LINUX OS

Следующая проблема – необходимость перехода на отечественные аппаратные средства. Как известно, наиболее распространенными элементами информационной системы является межсетевые экраны, коммутаторы и маршрутизаторы. Среди отечественных производителей коммутаторов достаточно активно развивается компания ELTEX, имеющая сертификацию ФСТЭК России на свою продукцию. Соответственно ее и будем предлагать в качестве импортозамещения. Среди маршрутизаторов кроме уже озвученной ELTEX, часто фигурирует компания DIONIS, как, например, вариант [26]. У межсетевых экранов разброс фирм еще больше чем у предыдущих устройств. Как вариант замены рекомендуем присмотреться к фирме ALTELL [27]. В части предустановленных защитных ПП считаем, что проблем не обнаружено (логика обновления их до последней версии само собой актуальна), потому далее дадим комментарии относительно не хватающих элементов физической (пассивной / активной) защиты.

1) Проблема плохо расположенных коммуникаций. С целью достижения максимизации защиты извне рекомендуется убрать весь электромонтаж из стен, прилегающих к оконной зоне (внешней стороны) помещений, установить на стекла системы активных помех, с целью недопущения утечки речевой и технической информации.

2) Установить купольную защиту периметра. В данном случае имеется ввиду средства, которые будут принудительно отключать беспилотные устройства посредством электромагнитных импульсов. Важно отметить, что система должна не только отключать электронику БПЛА, но и также, по возможности вызывать перегрузку устройств, с целью недопущения возобновления передачи информации как КА, так и ретрансляции украденной за пределы периметра предприятия с установленным СЦ. Кроме того, в данной системе должно присутствовать понятие «ведения» устройства, т.е. не просто бессмысленное циклическое распространение электромагнитных волн в пространство над зданиями и сооружениями, но и также анализ в какое место приземлился / упал БПЛА, а также направление его удаления при неэффективности изначальных мер электромагнитной борьбы.

3) Как рациональное предложение следует ввести применение газовых растворов, которые будут выпускаться по всему периметру верхней полусферы. Тем самым кроме блокирования возможности визуального управления малым ЛА, в случае использования механизмов с двигательной установкой не электрического характера, проводить засорение воздушных входов и нарушения законов Карно, действующих для двигателей внутреннего сгорания. Данная мера пусть и в меньшей степени, но все же будет эффективна также при воздействии на винты БПЛА, т.к. будет засорять контакты коннекта движителя с лопастями и по возможности стопорить их.

4) Решение проблемы передачи данных по беспроводным технологиям. С целью недопущения воровства сведений из СЦ по беспроводным каналам, логично по всему периметру установить системы активного глушения, тем самым, не допуская распространения WIFI, Bluetooth или иного сигнала за потребную рабочую зону.

5) Злонамеренное падение. О противостоянии данной угроз уже говорилось выше. Единственное замечание, которое следует сделать – это программное недопущение отключения систем активной борьбы с БПЛА. Т.е. минимизация возможности помощи злоумышленникам, управляющим малым ЛА изнутри.

6) Установка пассивных защитных систем от попадания внутрь защищаемого объекта БПЛА. Рекомендуется кроме сеток, применять датчики звукового анализа (оценка нападавшего, чтобы не перепутать с птицей, крысой, белкой и т.п.). Датчики приближения также рационально разместить, хотя, они будут скорее дублирующим контуром.

7) Закрытие всех пустых портов серверной составляющей, а также устройств распространения данных заглушками. В данном случае будет не допущено даже при попадании БПЛА внутрь СЦ его физического подключения. Более того, при наличии специальных замков не будет возможности использовать малый ЛА как транспорт для доставки данных, скопированных на флеш-карту.

Проведем оценку вновь примененных защитных мер.

1) Программное обеспечение. Общие затраты на него составят порядка 1 млн. руб., с учетом установки как на ПО внутри СЦ, так и на связанные элементы.

2) Применение отечественных аппаратных средств. На маршрутизирующее устройства средняя стоимость будет составлять 190000 руб. (Крафтвэй)

На коммутирующее устройство – 520000 руб. (DIONIS)

На межсетевой экран – 3100000 руб. (IDECO)

3) Переоборудование коммуникаций – стоимость: 3500000 руб.

4) Средства принудительной посадки – 12500000 руб.

5) Применение газовой системы – 8000000 руб.

6) Системы активной блокировки – минимум 50 штук, по цене – 110000 руб. / шт.

7) Системы активного зашумления эфира – 4600000 руб.

8) Заглушки – 100000 руб.

Итого, суммарно: $1000000 + 190000 + 5200000 + 3100000 + 3500000 + 12500000 + 8000000 + 5500000 + 4600000 + 10000 = 43600\ 000$ руб.

Как можно заметить, 560000000 руб. >> 43600000 руб.

Таким образом, применение данных рекомендаций позволит добиться большего успеха при защите информации СЦ.

Вывод. Результаты исследования могут быть полезны для специалистов отрасли ИБ, т.к. отражают мало освещенный материал защиты СЦ; позволяет заострить внимание на необходимости реализации должной системы защиты. Особо следует уделить внимание описанию четырех обобщенных вариантов проведения атак, а также плохой защищенности от БПЛА. Содержащиеся в работе рационализаторские предложения позволят сотрудникам службы ИБ провести их реализацию на конкретном объекте.

Библиографический список:

1. Шулаева Е.А., Маринич А.А. Разработка системы мониторинга безопасности информационной среды предприятия//Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2023. – №1. – С.144-155.
2. Липатов Ю.В. К вопросу об информационных угрозах безопасности в органах государственной власти Российской Федерации // Тенденции развития науки и образования. – 2022. – № 83-2. – С.59-63.
3. Басан Е.С., Басан А.С., Некрасов А.В. [и др.]. База знаний об атаках на беспилотные летательные аппараты//Системный синтез и прикладная синергетика:сборник научных работ X Всероссийской научной конференции, пос. Нижний Архыз, 28 сентября 2021 года. Ростов-на-Дону, Таганрог: Южный федеральный университет, 2021. – С.170-178.
4. Шестаков Н.В. Исследование радиолокационных отражений от беспилотных летательных аппаратов с малой эффективной поверхностью рассеяния//Известия ТулГУ. Технические науки. – 2022. – №2. – С.402-407.
5. В РФ растёт количество атак на информационные системы и физическую инфраструктуру предприятий, согласно данным от «Лаборатории Касперского». <https://www.ixbt.com/news/2022/12/12/v-rf-rastjot-kolichestvo-atak-na-informacionnye-sistemy-i-fizicheskuju-infrastrukturu-predpriyatij-soglasno-laboratorii.html> (дата обращения 24.03.2024).
6. Клебанов Л.Р., Полубинская С.В. Компьютерные технологии в совершении преступлений диверсионной и террористической направленности // Вестник РУДН. Серия: Юридические науки. – 2020. – № 3. – С.717-734.
7. Котенко И.В., Саенко И.Б., Авраменко В.С. Концептуальный подход к обеспечению информационной безопасности системы распределенных ситуационных центров//Информатизация и связь. – 2019. – №3. – С.37-43.
8. Райков А.Н. Целостный дискурс ситуационного центра // Межотраслевая информационная служба. – 2012. – № 3. – С.47-54.
9. Казаков Е.А. Ситуационный центр как современный инструмент обеспечения непрерывности деятельности на предприятии // Развитие науки и практики в глобально меняющемся мире в условиях рисков:Сб. материалов IV Международной научно-практической конференции, Москва, 10 мая 2021 года. –Махачкала. ООО "Институт развития образования и консалтинга", 2021. – С.195-198.

10. Жаныбек Ж.А., Попова Г.В. Информационная безопасность ситуационного центра//Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. – 2017. – № 3. – С. 181-186.
11. Цели и задачи информационной безопасности системы распределенных ситуационных центров (СРСЦ) определяются «Концепцией информационной безопасности системы распределенных ситуационных центров, работающих по единому регламенту взаимодействия».
12. Титов К.А., Водяницкая С.И. Концептуальные подходы к сравнению российских операционных систем с открытым кодом // Научные исследования 2023: актуальные теории и концепции: сборник материалов ХХІХ-ой международной очно-заочной научно-практической конференции, Москва, 24 мая 2023 года. Том 1. – Москва: Научно-издательский центр "Империя", 2023. – С. 39-43.
13. Евдокимова А.А. Рынок информационной безопасности РФ//Актуальные проблемы развития экономики России в условиях новых вызовов: сборник научных трудов по итогам научной конференции, Москва, 08–09 ноября 2022г. Москва: ИТК «Дашков и К», 2022. – С.83-87.
14. ФСТЭК оставит иностранные компании без сертификатов. – URL: <https://www.securitylab.ru/news/530814.php?r=1> (дата обращения: 16.10.2024).
15. Юдин А.П. Проблемы обеспечения информационной безопасности телекоммуникационных технологий предприятия // Вестник науки. – 2023. – №5(62). – С.437-443
16. Грехов А.С., Поликанин А.Н., Титов Д.Н. Исследование средств противодействия оптическим каналам утечки информации с использованием беспилотных летательных аппаратов // интерэкспо гео-сибирь. – 2022. – С.39-46.
17. Финансовая компания обнаружила, что ее пытаются взломать с помощью дрона с WiFi Pineapple на борту. - URL: <https://xaker.ru/2022/10/13/drone-hacking/> (дата обращения 20.03.2024)
18. Патент № 2729905 С1 Российская Федерация, МПК G05D 1/10, B64C 39/00. Способ управления беспилотным летательным аппаратом : № 2019126994 : заявл. 26.08.2019 : опубл. 13.08.2020 / С.Ю. Бибииков, А.И. Поляков, М.Л. Тучинский [и др.] ; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство обороны Российской Федерации.
19. Приказ ФСТЭК России от 11.02.2013г. № 17 «Об утверждении Требований о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах».
20. Уровни возможностей нарушителя. <https://bdu.fstec.ru/threat-ction/potential?ysclid=lpei6ta63f793896869> (дата обращения 05.11.2024)
21. Шондиров Р.Х. Киберпространство: новая платформа для терроризма // Право и управление. – 2023. – № 2. – С.141-145.
22. БДУ ФСТЭК - Реестр. <https://service.securitm.ru/bduthreats?ysclid=lpfulb2kh2553360154> (дата обращения: 12.11.2024).
23. 54 вида кибератак, о которых следует знать в 2024 году. <https://dzen.ru/a/ZUYNJUusBWYBYvzz> (дата обращения: 20.11.2024).
24. Среднее предприятие: критерии отнесения в 2024 году. <https://www.rnk.ru/article/217538-srednee-predpriyatije-kriterii-otneseniya-v-2024-godu?ysclid=lry2qded9s484735943> (дата обращения: 25.01.2024).
25. Операционные системы. <https://rusbitech.ru/products/os/?ysclid=lqihyyvmd7425699666> (дата обращения: 10.12.2024).
26. Маршрутизатор Dionis DPS-3006. https://dzen.ru/a/XvTr27cM-1f_ZXSb (дата обращения: 10.12.2024).
27. Аппаратный межсетевой экран ALTELL NEO — защита корпоративной, локальной сети. - URL: <https://altell.ru/products/neo/?ysclid=lqijluoqi1592987623> (дата обращения: 10.12.2024).

References:

1. Shulaeva E.A., Marinich A.A. Development of an enterprise information environment security monitoring system. *Electrotechnical and information complexes and systems*. 2023;1:144-155.
2. Lipatov Yu.V. On the issue of information security threats in public authorities of the Russian Federation. *Trends in the development of science and education*. 2022;83-2:59-63.
3. Basan E.S., Basan A.S., Nekrasov A.V. [and]. Knowledge base on attacks on unmanned aerial vehicles. System synthesis and applied synergetics :coll. of Scientific papers of the X All-Russian Scientific Conference, Nizhny Arkhyz, 28 09 2021. Rostov-on-Don, Taganrog: Southern Federal University, 2021;70-178.
4. Shestakov N.V. Investigation of radar reflections from unmanned aerial vehicles with a small effective scattering surface. *News of TulSU. Technical sciences*. 2022; 2:402-407.
5. The number of attacks on information systems and physical infrastructure of enterprises is growing in the Russian Federation, according to data from Kaspersky Lab. <https://www.ixbt.com/news/2022/12/12/v-rf-rastjot-kolichestvo-atak-na-informacionnye-sistemy-i-fizicheskiju-infrastrukturu-predpriyatij-soglasno-laboratorii.html> (accessed 03/24/2024).
6. Klebanov L.R., Polubinskaya S.V. Computer technologies in the commission of subversive and terrorist crimes. *Bulletin of the RUDN University. Series: Legal Sciences*. 2020;3:717-734.
7. Kotenko I.V., Saenko I.B., Avramenko V.S. A conceptual approach to ensuring information security of a system of distributed situational centers. *Informatization and communication*, 2019;3:37-43.

8. Raikov A.N. Holistic discourse of a situational center. *An intersectoral information service*. 2012;3:47-54.
9. Kazakov E.A. Situational center as a modern tool for ensuring business continuity at an enterprise. Development of science and practice in a globally changing world under conditions of risks : Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference, Moscow, May 10, 2021. – Makhachkala: Limited Liability Company "Institute for the Development of Education and Consulting", 2021, pp.195-198.
10. Zhanybek Zh.A., Popova G.V. Information security of the situational center. *Bulletin of the D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University*. 2017; 3:181-186.
11. The goals and objectives of information security of the system of distributed situational centers (SRSC) are defined by the "Concept of information security of the system of distributed situational centers operating according to a single regulation of interaction."
12. Titov K.A., Vodianskaya S.I. Conceptual approaches to comparing Russian open source operating systems. Scientific Research 2023:current theories and concepts:proceedings of the XXIX TH International Correspondence Scientific and Practical Conference, Moscow, May 24, 2023;1:39-43. Moscow: Empire Scientific Publishing Center.
13. Evdokimova A.A. The information security market of the Russian Federation. Actual problems of the development of the Russian economy in the context of new challenges :a collection of scientific papers based on the results of a scientific conference, Moscow, November 08-09, 2022:83-87. Moscow, November 08-09, 2022. Moscow: Dashkov & Co. 2022:83-87 (In Russ)
14. The FSTEC will leave foreign companies without certificates. – URL: <https://www.securitylab.ru/news/530814.php?r=1> (date of reference: 16.10.2024).
15. Yudin A.P. Problems of ensuring information security of telecommunication technologies of the enterprise *Bulletin of Science*. 2023;5(62):437-443.
16. Grekhov A.S., Polikanin A.N., Titov D.N. Investigation of means of countering optical channels of information leakage using unmanned aerial vehicles. *Interexpo geo-siberia*. 2022;39-46.
17. A financial company discovered that they were trying to hack it using a drone with a WiFi Pineapple on board. - URL: <https://xakep.ru/2022/10/13/drone-hacking/> (accessed 20.03.2024).
18. Patent No. 2729905 C1 Russian Federation, IPC G05D 1/10, B64C 39/00. Method of controlling an unmanned aerial vehicle : No. 2019126994 : application. 26.08.2019 : published 13.08.2020 / S.Y. Bibikov, A.I. Polyakov, M.L. Tuchinsky [et al.] ; applicant is the Russian Federation, on behalf of which the Ministry of Defense of the Russian Federation acts.
19. FSTEC of Russia Order No. 17 February 11, 2013 "On Approval of Requirements for the Protection of Information Not Constituting a State Secret Contained in State Information Systems.
20. Levels of intruder's capabilities. - URL: <https://bdu.fstec.ru/threat-section/potential?ysclid=lpei6ta63f793896869> (accessed 05.11.2024).
21. Shondirov R.H. Cyberspace: a new platform for terrorism. *Law and Governance*. 2023; 2:C.141-145.
22. FSTEC Database Registry. - URL: <https://service.securitm.ru/bduthreats?ysclid=lpfulb2kh2553360154> (date of request: 12.11.2024).
23. 54 types of cyber attacks that you should be aware of in 2024. <https://dzen.ru/a/ZUYNJUusBWYBYvzz> (date of request: 11/20/2023).
24. Medium-sized enterprises: criteria for assignment in 2024 <https://www.rnk.ru/article/217538-srednee-predpriyatie-kriterii-otneseniya-v-2024-godu?ysclid=lry2qded9s484735943> (accessed: 25.01.2024).
25. Operating systems. <https://rusbitech.ru/products/os/?ysclid=lqihyyvmd7425699666> (date of request: 10.12.2024).
26. Dionis DPS-3006 router. - URL: https://dzen.ru/a/XvTr27cM-1f_ZXSb (date of request: 10.12.2024).
27. ALTELL NEO hardware Firewall - corporate, local network protection. <https://altell.ru/products/neo/?ysclid=lqijluoqi1592987623> (date of request: 10.12.2024). (In Russ)

Сведения об авторах:

Лоскутов Иван Андреевич, инженер – конструктор, отдел 55; преподаватель; доцент кафедры индустриального программирования Института перспективных технологий и индустриального программирования; faxvex@ya.ru

Репенко Виктор Андреевич, магистрант; ekspert6@ya.ru

Information about the authors:

Ivan A. Loskutov, Engineer-constructor, Department 55, Teacher; Assoc.Prof., Department of Industrial Programming at the Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming; faxvex@ya.ru

Viktor A. Repenko, Master's student; ekspert6@ya.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 20.10.2025.

Одобрена после рецензирования/Reviced 28.11.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 20.01.2026.

Оценивание параметров однородной вложенной кусочно-линейной регрессии второго типа со вторым порядком вложенности

С.И. Носков, А.П. Медведев

Иркутский государственный университет путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка алгоритмического способа идентификации параметров однородной вложенной кусочно-линейной регрессии второго типа со вторым порядком вложенности с помощью метода наименьших модулей. **Метод.** Оценивание неизвестных параметров осуществляется путем сведения к задаче линейно-булева программирования. Ее решение не должно вызывать вычислительных трудностей вследствие наличия значительного количества соответствующих эффективных программных средств. **Результат.** Решение сформированной задачи линейно-булева программирования позволяет вычислять оценки параметров модели, а анализ оптимальных значений булевых компонент - определять характер срабатывания внешнего и внутренних максимумов обоих уровней в ней. **Вывод.** Результаты решения численного примера указывают на эффективность предложенного способа вычисления оценок параметров однородной вложенной кусочно-линейной регрессии второго типа со вторым порядком вложенности с помощью метода наименьших модулей.

Ключевые слова: однородная вложенная кусочно-линейная регрессия второго типа со вторым порядком вложенности, идентификация параметров, метод наименьших модулей, задача линейно-булева программирования, размерность

Для цитирования: С.И. Носков, А.П. Медведев. Оценивание параметров однородной вложенной кусочно-линейной регрессии второго типа со вторым порядком вложенности. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(1):151-156. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-151-156.

Estimation of parameters of homogeneous nested bilinear regression of the second type with the second order of nesting

S.I. Noskov, A.P. Medvedev

Irkutsk State Transport University,
15 Chernyshevskogo St., Irkutsk 664074, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop an algorithmic method for identifying the parameters of a homogeneous nested piecewise linear regression of the second type with the second order of nesting using the least absolute values method. **Method.** Estimating unknown parameters is accomplished using a linear-Boolean programming problem. Its solution presents no computational difficulties due to the availability of a significant number of effective software tools. **Result.** The solution of the formed linear-Boolean programming problem allows us to calculate estimates of the model parameters, and the analysis of the optimal values of the Boolean components - to determine the nature of the response of the external and internal maxima of both levels in it. **Conclusion.** The results indicate the effectiveness of the proposed method for calculating the parameter estimates of a homogeneous nested piecewise linear regression of the second type with the second order of nesting using the least absolute values method.

Keywords: homogeneous nested piecewise linear regression of the second type with the second order of nesting, parameter identification, least absolute values method, linear-Boolean programming problem, dimension

For citation: S.I. Noskov, A.P. Medvedev. Estimation of parameters of homogeneous nested bilinear regression of the second type with the second order of nesting. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):151-156. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-151-156.

Введение. Особый интерес исследователей при изучении технических и социально-экономических объектов вызывают случаи, когда их функционирование бывает подвержено различного рода флуктуациям и возмущениям, что может приводить к риску нарушения устойчивости в характере взаимовлияния задействованных факторов. Если же при таких исследованиях применяются методы математического моделирования, подобные ситуации требуют привлечения, наряду с линейными, существенно нелинейных аппроксимирующих форм, в том числе обладающих высокими порядками относительно используемых операций.

Так, в работе [1] предложен способ аппроксимации амплитудного коэффициента в модели высокого порядка для среды со сложной реологией. В [2] осуществляется групповой анализ уравнений высокого порядка для описания модели Ферми–Паста–Улама.

В статье [3] рассматриваются расчеты течения разреженного газа на основе нелинейных модельных уравнений Больцмана с использованием детерминированных унифицированных алгоритмов высокого порядка для газовой кинетики в фазовом пространстве. Разработано несколько таких алгоритмов, которые сочетают метод дискретных ординат скорости в пространстве скоростей и компактные конечно-разностные схемы высокого порядка в физическом пространстве.

Исследование [4] посвящено изучению различных динамических особенностей, лежащих в основе взаимодействия солитонов в обобщенном нелинейном уравнении Шредингера высокого порядка, которое моделирует распространение многомодовых волн в различных физических ситуациях нелинейной оптики. При этом новые точные решения обобщенного нелинейного уравнения Шредингера высокого порядка построены с помощью символьных вычислений с использованием модифицированного расширенного прямого алгебраического метода.

В работе [5] предлагается новый метод адаптивного управления скользящим режимом без использования моделей для решения некоторых задач управления в классе дискретных во времени нелинейных систем высокого порядка, динамика которых неизвестна. Для упрощения нелинейной системы вводится новое понятие, называемое матрицей псевдочастных производных, которое облегчает моделирование нелинейной системы с помощью подхода к динамической линеаризации в компактной форме.

В статье [6] показано, что внешние потенциалы в полностью интегрируемых неавтономных нелинейных динамических системах высшего порядка могут быть представлены в виде бесконечного степенного ряда с изменяющимися во времени коэффициентами. В качестве репрезентативного примера вводится обобщенное уравнение Хироты в рамках неизоспектрального обобщения метода обратного преобразования рассеяния с соответствующим спектральным параметром, изменяющимся в соответствии с уравнением Риккати.

В [7] разработана новая суррогатная модель на основе полиномов высокого порядка (HOPSM), позволяющая избежать рутинных задач дорогостоящего компьютерного моделирования в инженерии. HOPSM сохраняет преимущества традиционных моделей на основе полиномов низкого порядка в плане эффективности, прозрачности и простоты, избегая при этом их недостатков в точности. В численном процессе для генерации начального набора выборок используется схема заполнения пространства, а затем для отбора большего количества выборок из всех кандидатов применяется инкрементальный метод, основанный на принципе максимина.

В работе [8] рассматривается задача слежения за классом нелинейных систем высокого порядка с задержкой на входе. Неизвестные непрерывные функции системы

оцениваются с помощью систем нечеткой логики. Вводится метод преобразования состояний для устранения запаздывающего входного элемента. С помощью алгоритма обратного перехода достигается свойство полуглобальной равномерной конечной ограниченности замкнутой системы.

В исследовании [9] предлагается новая гибридная дискретизация высокого порядка для класса линейных и нелинейных моделей упругости в режиме малых деформаций, которые широко используются в механике твёрдого тела. Предложенный метод применим в двух- и трёхмерном пространстве, поддерживает общие сетки, включая полиэдральные элементы и несовпадающие интерфейсы, допускает произвольный порядок аппроксимации, а стоимость разрешения может быть снижена путём статического уплотнения большого подмножества неизвестных для линеаризованных версий задачи.

В статье [10] предложена модель рекуррентной нейронной сети высшего порядка, которая основана на модели пи-сигма и реализована для косвенного адаптивного управления нелинейной динамической системой.

Параметры предлагаемого контроллера настраиваются с помощью метода асинхронного обратного распространения, основанного на градиентном спуске. Повышена производительность алгоритма обучения, что достигается за счёт внедрения схемы адаптивной скорости обучения, обеспечивающей правильную установку значения скорости обучения на каждой итерации.

Постановка задачи. В работах [11, 12] с помощью обобщения известных кусочно-линейных регрессионных конструкций введены два типа вложенных кусочно-линейных регрессий первого порядка – простая и однородная.

При этом однородная вложенная кусочно-линейная регрессия первого типа имеет вид:

$$y_k = \min\{\min_{i \in I^1}\{a_i^1 x_{ki}\}, \dots, \min_{i \in I^G}\{a_i^G x_{ki}\}\} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где k – номер наблюдения, y – зависимая переменная, $x_i, i = \overline{1, m}$ – независимые переменные, $a_i^j, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, G}$ – подлежащие оцениванию параметры, $\varepsilon_k, k = \overline{1, n}$ – ошибки аппроксимации, n – количество наблюдений (длина выборки).

Индексные множества $I^i, i = \overline{1, G}$, являются наперед заданными подмножествами множества номеров независимых переменных $\{1, 2, \dots, m\}$ и могут, в общем случае, иметь непустые пересечения. Все переменные в регрессионной модели (1) детерминированы.

В работе [13] описан основанный на методе наименьших модулей алгоритмический способ оценивания неизвестных параметров регрессии (1), сводящийся для оптимизационной задачи

$$I_1(\alpha) = \sum_{k=1}^n |\varepsilon_k| \rightarrow \min \quad (2)$$

к задаче линейно-булева программирования (ЛБП).

В работах [11, 12] указано, что наряду с первым порядком вложенности для таких регрессий могут быть использованы и более высокие порядки. Так, в частности, однородная кусочно-линейная регрессия второго типа со вторым порядком вложенности примет в этом случае вид:

$$y_k = \max\{\max\{\max_{i \in I^{11}}\{a_i^{11} x_{ki}\}, \dots, \max_{i \in I^{1w_1}}\{a_i^{1w_1} x_{ki}\}\}, \dots, \max\{\max_{i \in I^{G1}}\{a_i^{G1} x_{ki}\}, \dots, \max_{i \in I^{Gw_G}}\{a_i^{Gw_G} x_{ki}\}\}\} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где w_i и I^{ij} – также заданные числа и индексные множества, $I^{ij} \subset \{1, 2, \dots, m\}, i = \overline{1, G}, j = \overline{1, w_i}$.

Поставим задачу идентификации неизвестных параметров $a_i^{je}, j = \overline{1, G}, e = \overline{1, w_j}, i \in I^{je}$.

Методы исследования. Для решения задачи (2) по отношению к модели (3) воспользуемся вычислительными приемами, примененными в работе [13].

Введем в рассмотрение неизвестные вещественные переменные:

$$\begin{aligned} v_{kje} &= \max_{i \in I^{je}} \{a_i^{je} x_{ki}\}, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, G}, e = \overline{1, w_j}, \\ h_{kj} &= \max_{e = \overline{1, w_j}} v_{kje}, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, G}, \\ f_k &= \max_{j = \overline{1, G}} h_{kj}, j = \overline{1, G}. \end{aligned}$$

Также введем булевы переменные:

$$\begin{aligned} s_{kije} &= \begin{cases} 1, & v_{kje} = \max_{t \in I^{je}} \{a_t^{je} x_{kt}\} = a_i^{je} x_{ki} \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \\ r_{kje} &= \begin{cases} 1, & h_{kj} = \max_{t = \overline{1, w_j}} v_{kjt} = v_{kje} \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \\ o_{kj} &= \begin{cases} 1, & f_k = \max_{t = \overline{1, G}} h_{kt} = h_{kj} \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \\ k &= \overline{1, n}, j = \overline{1, G}, e = \overline{1, w_j}, i \in I^{je}. \end{aligned}$$

Тогда задача определения оценок параметров регрессии (3) путем решения задачи (2) также может быть сведена к следующей задаче ЛБП:

$$v_{kje} \geq a_i^{je} x_{ki}, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, G}, e = \overline{1, w_j}, i \in I^{je}, \quad (4)$$

$$a_i^{je} x_{ki} - v_{kje} \geq (s_{kije} - 1)M_i, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, G}, e = \overline{1, w_j}, i \in I^{je}, \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I^{je}} s_{kije} = 1, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, G}, e = \overline{1, w_j}, \quad (6)$$

$$h_{kj} \geq v_{kje}, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, G}, e = \overline{1, w_j}, \quad (7)$$

$$v_{kje} - h_{kj} \geq (r_{kje} - 1)M, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, G}, e = \overline{1, w_j}, \quad (8)$$

$$\sum_{e = \overline{1, w_j}} r_{kje} = 1, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, G}, \quad (9)$$

$$f_k \geq h_{kj}, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, G}, \quad (10)$$

$$h_{kj} - f_k \geq (o_{kj} - 1)M, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, G}, \quad (11)$$

$$\sum_{j = \overline{1, G}} o_{kj} = 1, k = \overline{1, n}, \quad (12)$$

$$f_k + u_k - d_k = y_k, k = \overline{1, n}, \quad (13)$$

$$u_k \geq 0, d_k \geq 0, k = \overline{1, n}, \quad (14)$$

$$v_{kje} \geq 0, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, G}, e = \overline{1, w_j}, \quad (15)$$

$$h_{kj} \geq 0, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, G}, \quad (16)$$

$$f_k \geq 0, k = \overline{1, n}, \quad (17)$$

$$s_{kije} \in \{0, 1\}, k = \overline{1, n}, i \in I^{je}, j = \overline{1, G}, e = \overline{1, w_j}, \quad (18)$$

$$r_{kje} \in \{0, 1\}, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, G}, e = \overline{1, w_j}, \quad (19)$$

$$o_{kj} \in \{0, 1\}, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, G}, \quad (20)$$

$$\sum_{k=1}^n (u_k + d_k) - \sum_{j=1}^G \sum_{e=1}^{w_j} \sum_{i \in I^{je}} \tau_{ije} a_i^{je} \rightarrow \min. \quad (21)$$

Здесь $N, M_i, i = \overline{1, m}$ – наперед заданные большие, а $\tau_{ije}, j = \overline{1, G}, e = \overline{1, w_j}, i \in I^{je}$ – малые положительные константы.

Присутствие в целевой функции (21) второго слагаемого обеспечивает единственность решения задачи ЛБП (4) - (21).

Обсуждение результатов. С помощью датчика случайных чисел сформируем выборку данных (табл.1):

Таблица 1. Выборка данных
Table 1. Data sampling

y	x_1	x_2	x_3	x_4
5.42	2.78	2.97	4.46	7.9
3.04	1.66	6.97	5.73	3.58
1.06	2.85	4.31	4.51	8.72
4.89	8.73	5.67	2.81	8.29
1.07	6.59	1.1	4.22	4.15
4.85	1.79	1.84	8.46	4.77
2.89	4.98	2.47	6.45	3.62
2.68	3.67	3.18	7.45	1.41

На ее основе построим однородную кусочно-линейную регрессию второго типа со вторым порядком вложенности вида:

$$y_k = \max\{\max\{\max\{a_1^{11}x_{k1}, a_4^{11}x_{k4}\}, \max\{a_2^{12}x_{k2}, a_3^{12}x_{k3}\}\}, \max\{\max\{a_1^{21}x_{k1}, a_3^{21}x_{k3}\}, \max\{a_1^{22}x_{k1}, a_2^{22}x_{k2}\}\}\} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1,8}.$$

Таким образом, здесь $n=8$, $m=4$, $G=2$, $w_1=w_2=2$, $I^{11}=\{1,4\}$, $I^{12}=\{2,3\}$, $I^{21}=\{1,3\}$, $I^{22}=\{1,2\}$. Зададим требуемые константы:

$$N = M_i=1000, i=\overline{1,4}, \tau_{ije}=0.0001, j = \overline{1,2}, e = \overline{1,2}, i \in I^{je}.$$

В результате решения задачи ЛБП (4) – (21) получим следующую модель:

$$y_k = \max\{\max\{\max\{0.56x_{k1}, 0.18x_{k4}\}, \max\{0.43x_{k2}, 0.09x_{k3}\}\}, \max\{\max\{0.56x_{k1}, 0.45x_{k3}\}, \max\{0.56x_{k1}, 0.13x_{k2}\}\}\} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1,8}. \quad (22)$$

$I_1=8.72.$

Анализ оптимальных значений булевых компонент решения задачи позволяет определить характер срабатывания внешнего и внутренних максимумов обоих уровней в регрессии (22).

Вывод. В работе поставлена задача идентификации параметров однородной вложенной кусочно-линейной регрессии второго типа со вторым порядком вложенности с помощью метода наименьших модулей. Получены следующие результаты.

1. Поставленная задача сведена к задаче линейно-булева программирования.
2. Сформированная задача ЛБП имеет довольно высокую размерность для решения практических проблем, связанных с моделированием, что, однако, не должно вызывать вычислительных трудностей вследствие наличия соответствующих эффективных программных средств.
3. Анализ оптимальных значений булевых компонент решения задачи позволяет определить характер срабатывания внешнего и внутренних максимумов обоих уровней в построенной вложенной модели.
4. Решен численный пример.

Библиографический список:

1. Бойченко Н.В., Клейдман О.В., Тюленева О.Н. Аппроксимация амплитудного коэффициента в модели высокого порядка для среды со сложной реологией // Труды Академэнерго. 2006. № 4. С.79–86.
2. Волков А.К., Кудряшов Н.А. Групповой анализ уравнений высокого порядка для описания модели Ферми–Паста–Улама // Вестник Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ". - 2016. - Т. 5. - № 6. - С. 528–533.
3. Li Z.-H., Peng A.-P., Zhang H.-X., Yang J.-Y. Rarefied gas flow simulations using high-order gas-kinetic unified algorithms for Boltzmann model equations // Progress in Aerospace Sciences. 2015;74:81–113.
4. Arshad M., Seadawy A.R., Lu D. Bright–dark solitary wave solutions of generalized higher-order nonlinear Schrödinger equation and its applications in optics // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. - 2017. - V. 31. - № 16. - P. 1711–1721.
5. Xu D., Song X., Yan W., Jiang B. Model-free adaptive command-filtered-backstepping sliding mode control for discrete-time high-order nonlinear systems // Information Sciences. - 2019. - V. 485. - P. 141–153.
6. Belyaeva T.L., Serkin V.N. Nonlinear dynamics of nonautonomous solitons in external potentials expressed by time-varying power series: exactly solvable higher-order nonlinear and dispersive models // Nonlinear Dynamics. - 2022. - V. 107. - P. 1153–1162.

7. Wu J., Luo Z., Zheng J., Jiang C. Incremental modeling of a new high-order polynomial surrogate model // *Applied Mathematical Modelling*. - 2016. - V. 40. - № 7–8. - P. 4681–4699.
8. Zhu Q., Song A.-G., Zhang T.-P., Yang Y.-Q. Fuzzy adaptive control of delayed high order nonlinear systems // *International Journal of Automation and Computing*. - 2012. - V. 9. - P. 191–199.
9. Botti M., Di Pietro D.A., Sochala P. A Hybrid High-Order Method for Nonlinear Elasticity // *SIAM Journal on Numerical Analysis*. - 2017. - V. 55. - № 6.
10. Kumar R. Double internal loop higher-order recurrent neural network-based adaptive control of the nonlinear dynamical system // *Soft Computing*. - 2023. - V. 27. - P. 17313–17331.
11. Носков С.И. Подход к формализации вложенной кусочно-линейной регрессии // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. - 2023. - № 1–2 (76). - С. 218–220.
12. Носков С.И. Некоторые формы вложенной кусочно-линейной регрессии // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. - 2023. - № 3. - С. 467–469.
13. Носков С.И., Белинская С.И. Вычисление оценок параметров однородной вложенной кусочно-линейной регрессии // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. - 2023. - Т. 50. - № 4. - С. 115–120.

References:

1. Boychenko N.V., Kleydman O.V., Tyuleneva O.N. Approximation of the amplitude coefficient in a high-order model for a medium with complex rheology. *Proceedings of Academenergo*. 2006; 4:79–86.
2. Volkov A.K., Kudryashov N.A. Group analysis of high-order equations for describing the Fermi–Pasta–Ulam model. *Bulletin of the National Research Nuclear University "MEPhI"*. 2016;5(6):528–533.
3. Li Z.-H., Peng A.-P., Zhang H.-X., Yang J.-Y. Rarefied gas flow simulations using high-order gas-kinetic unified algorithms for Boltzmann model equations. *Progress in Aerospace Sciences*. 2015;74:81–113.
4. Arshad M., Seadawy A.R., Lu D. Bright–dark solitary wave solutions of generalized higher-order nonlinear Schrödinger equation and its applications in optics. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. – 2017;31(16):1711–1721.
5. Xu D., Song X., Yan W., Jiang B. Model-free adaptive command-filtered-backstepping sliding mode control for discrete-time high-order nonlinear systems. *Information Sciences*. 2019;485:141–153.
6. Belyaeva T.L., Serkin V.N. Nonlinear dynamics of nonautonomous solitons in external potentials expressed by time-varying power series: exactly solvable higher-order nonlinear and dispersive models. *Nonlinear Dynamics*. 2022;10:1153–1162.
7. Wu J., Luo Z., Zheng J., Jiang C. Incremental modeling of a new high-order polynomial surrogate model. *Applied Mathematical Modelling*. 2016;40(7–8):4681–4699.
8. Zhu Q., Song A.-G., Zhang T.-P., Yang Y.-Q. Fuzzy adaptive control of delayed high order nonlinear systems. *International Journal of Automation and Computing*. 2012;9:191–199.
9. Botti M., Di Pietro D.A., Sochala P. A Hybrid High-Order Method for Nonlinear Elasticity. *SIAM Journal on Numerical Analysis*. 2017;55(6)
10. Kumar R. Double internal loop higher-order recurrent neural network-based adaptive control of the nonlinear dynamical system. *Soft Computing*. 2023;27:17313–17331.
11. Noskov S.I. An approach to the formalization of nested piecewise linear regression. *International Journal of the Humanities and Natural Sciences*. 2023; 1–2 (76): 218–220.
12. Noskov S.I. Some forms of nested piecewise linear regression. *Izvestia of the Tula State University. Technical science*. 2023;3:467–469.
13. Noskov S.I., Belinskaya S.I. Calculation of parameter estimates for homogeneous nested piecewise linear regression. *Herald of the Dagestan State Technical University. Technical Science*. 2023;50(4):115–120.

Сведения об авторах:

Носков Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных технологий и защиты информации; sergey.noskov.57@mail.ru

Медведев Александр Петрович, ассистент кафедры информационных технологий и защиты информации; medvedeff.a.p@yandex.ru

Information about authors:

Sergey I. Noskov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof., Department of Information Technologies and Information Security; sergey.noskov.57@mail.ru

Alexander P. Medvedev, Assistant, Department of Information Technology and Information Security; medvedeff.a.p@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 20.09.2025.

Одобрена после рецензирования/Revised 29.10.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 26.01.2026.

**Технологии искусственного интеллекта в решении задач
информационной безопасности**

Д.А. Потиеенко, Д.С. Чмыхало, О.Л. Легонько

Донской государственный технический университет,
344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является анализ возможностей применения технологий искусственного интеллекта для решения задач информационной безопасности. **Метод.** Исследование основано на проактивном подходе, направленном на снижение негативного воздействия внутренних и внешних угроз; на принципах решения задач информационной безопасности, особенностях и возможностях интеллектуальных методов. **Результат.** Разработанный алгоритм внедрения технологий искусственного интеллекта в структуру системы информационной безопасности предприятия описывает основные этапы, которые необходимо пройти при построении интеллектуальных подсистем защиты информации. **Вывод.** Внедрение технологий искусственного интеллекта в сферу информационной безопасности позволит строить адаптивные интеллектуальные системы защиты информации, обеспечивающие оперативность реагирования на изменяющиеся угрозы, атаки и возникающие инциденты. Разработчикам и специалистам служб безопасности необходимо управление рисками, формирование принципов ответственности и прозрачности процессов функционирования интеллектуальных подсистем защиты информации.

Ключевые слова: информационная безопасность, защита информации, интеллектуальные технологии, искусственный интеллект, интеллектуальная система

Для цитирования: Д.А. Потиеенко, Д.С. Чмыхало, О.Л. Легонько. Технологии искусственного интеллекта в решении задач информационной безопасности. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(1):157-169. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-157-169.

Artificial Intelligence Technologies in Solving Information Security Problems

D.A. Potienko, D.S. Chmykhalo, O.L. Legonko

Don State Technical University,
1Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russia

Abstract. Objective. The purpose of this study is to analyze the potential of artificial intelligence technologies for solving information security problems. **Method.** The study is based on a proactive approach aimed at reducing the negative impact of internal and external threats; on the principles of solving information security problems; and on the features and capabilities of intelligent methods. **Result.** The developed algorithm for implementing artificial intelligence technologies describes the key steps required to build intelligent information security subsystems. **Conclusion.** The implementation of artificial intelligence technologies will enable the development of adaptive, intelligent security systems that quickly respond to threats, attacks, and incidents. Security professionals must manage risks and establish principles of accountability and transparency in the operation of intelligent information security subsystems.

Keywords: information security, information protection, intelligent technologies, artificial intelligence, intelligent system.

For citation: D.A.Potienko, D.S.Chmykhalo, O.L.Legonko. Artificial Intelligence Technologies in Solving Information Security Problems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):157-169. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-157-169.

Введение. В условиях стремительного развития информационных технологий и цифровизации общества, вопросы обеспечения информационной безопасности становятся все более актуальными для руководителей различных предприятий и организаций вне зависимости от их области деятельности. Атаки на информационные инфраструктуры, утечки персональных данных и другой конфиденциальной информации представляют серьезные риски для предприятий и частных лиц [1]. Указ Президента РФ «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» устанавливает основные направления и цели государственной политики в области искусственного интеллекта, указывает на необходимость внедрения технологий искусственного интеллекта в различные сферы, в том числе в защиту информации [2]. Искусственный интеллект предлагает новые подходы к решению проблем защиты информации, позволяя автоматизировать процессы обнаружения и реагирования на угрозы. Изучение технологий искусственного интеллекта в контексте информационной безопасности имеет большое значение для повышения эффективности защиты информации, минимизации рисков, и, как следствие, уменьшения финансовых и других потерь для предприятий.

Постановка задачи. Цель исследования заключается в анализе возможностей применения технологий искусственного интеллекта для решения задач информационной безопасности. Для достижения цели изучены существующие технологии искусственного интеллекта, определены области информационной безопасности, которые нуждаются в разработке эффективных способов решения задач, сформулированы рекомендации по внедрению технологий искусственного интеллекта в практику защиты информации. Важным представляется выполнение анализа потенциальных проблем, связанных с использованием интеллектуальных систем. Ключевыми вопросами информационной безопасности являются предотвращение утечки информации и несанкционированных воздействий на защищенную информацию, что определено в соответствии с ГОСТ Р 50922-2006 [3].

Информационная безопасность включает методы и действия, направленные на защиту конфиденциальной информации, например, такой как персональные данные, коммерческая тайна, интеллектуальная собственность. Основными задачами являются обеспечение целостности данных и доступность информации для пользователей с установленными правами доступа [4]. Для минимизации затрат руководство предприятия должно реализовать процессы управления инцидентами информационной безопасности [5]. Регулярное обновление программного обеспечения и мониторинг сетевого трафика позволяют выявлять уязвимости и предотвращать атаки [6]. Очень важным представляется этап обучения сотрудников основам информационной безопасности, принципам работы с конфиденциальной информацией и техническими средствами защиты информации. Это позволяет сократить количество инцидентов информационной безопасности, которые могут привести к утечке или модификации данных, уменьшить влияние человеческого фактора на уровень защищенности информационных ресурсов. Организационные меры защиты, включая разработку политики безопасности, соблюдение законодательных норм и стандартов, касающихся защиты предприятий от юридических рисков [7]. Постоянное совершенствование методов несанкционированного получения информации (вирусное программное обеспечение, фишинговые атаки), сложность современных информационных систем, которая делает их более уязвимыми к атакам, развитие таких технологий, как облачные вычисления и интернет-вещей, приводят к тому, что добиться требуемого уровня защищенности информационных ресурсов возможно только при условии создания комплексной системы защиты и своевременной модификации методов и средств защиты.

Эффективная защита требует проактивного подхода, направленного на снижение негативного воздействия внутренних и внешних угроз. Однако для многих предприятий является актуальной проблема финансирования для внедрения мер безопасности остается. Инвестиции в безопасность могут показаться высокими, но они необходимы для защиты информации и предотвращения серьезных последствий. Предприятия должны рассматривать информационную безопасность как приоритетную задачу, решение которой позволит

минимизировать риски и возможные потери. Решение проблем защиты информации требует комплексного подхода и стратегического планирования.

Методы исследования. Одним из перспективных направлений является внедрение технологий искусственного интеллекта в практику защиты информации [8]. Потенциально это позволит реализовать анализ больших объемов данных в реальном времени, с целью выявления аномалий и подозрительного поведения пользователей, обеспечит значительное сокращение времени реагирования на инциденты. Алгоритмы машинного обучения способны обучаться на исторических данных, что позволит им лучше распознавать потенциальные угрозы, и повысит точность обнаружения атак. Искусственный интеллект обладает способностью адаптироваться к новым данным, посредством дообучения в процессе выполнения пользователями обновления моделей и реализации процедур обучения.

Термин «искусственный интеллект» появился в начале 60-х годов XX в. [9]. Искусственный интеллект фокусируется на создании машин, способных выполнять задачи, требующие человеческого интеллекта [10]. Это включает обработку естественного языка, распознавание образов и принятие решений.

Интеллектуальная система - это информационно-вычислительная система, обладающая способностью к накоплению, анализу больших массивов информации, модификации знаний на основе полученной информации, принятию решений в условиях неопределенности, адаптации, самообучения, самоорганизации [11]. Интеллектуальная система способна действовать целенаправленно, используя логические выводы и алгоритмы. Как правило, интеллектуальные системы рассматриваются в контексте управления и оптимизации процессов и могут интегрироваться в различные сферы деятельности человека, от медицины до промышленности.

Технологии искусственного интеллекта - это множество методов, позволяющих машинам выполнять задачи, требующие интеллекта, аналогичного человеческому. Эти методы, применяются для решения широкого спектра задач, включая автоматизацию процессов, анализ данных и взаимодействие с пользователями. Согласно Указа Президента РФ, технологии искусственного интеллекта представляют собой совокупность технологий, включающую компьютерное зрение, обработку естественного языка, распознавание и синтез речи, интеллектуальную поддержку принятия решений и перспективные методы искусственного интеллекта [2].

Компьютерное зрение - это область, занимающаяся анализом и интерпретацией визуальной информации с помощью алгоритмов искусственного интеллекта [12]. Технологии компьютерного зрения применяются для распознавания объектов и лиц на изображениях и видео, что особенно необходимо в таких сферах как информационная и национальная безопасность, медицина и автомобильная промышленность.

Обработка естественного языка представляет собой технологию искусственного интеллекта, реализация которой позволяет компьютерной системе понимать и генерировать тексты на естественных языках [13]. Обработка естественного языка применяется в таких областях, как чат-боты, системы перевода и голосовые помощники. Распознавание и синтез речи - это технология искусственного интеллекта, позволяющая преобразовать речевые сигналы в текстовую информацию - распознавание речи, и, наоборот, создать речевой сигнал из текстовых данных - синтез речи [14], широко применяются в голосовых помощниках, системах автоматического перевода и интерфейсах для слабовидящих.

Интеллектуальная поддержка принятия решений использует методы искусственного интеллекта для анализа исходных данных, выявления закономерностей и формирования рекомендаций для пользователя [15]. Такие системы помогают специалистам принимать более обоснованные и быстрые решения в сложных ситуациях, минимизируя человеческий фактор. Понятие перспективных методов искусственного интеллекта приводится в Указе Президента РФ: это методы, направленные на создание принципиально новой научно-технической продукции, в том числе в целях разработки универсального (сильного) искусственного интеллекта [2]. Исследователи, занимающиеся развитием теории искусственного

интеллекта и внедрением его в различные области деятельности, используют классификацию, в соответствии с которой выделяется три вида искусственного интеллекта, в зависимости от его функциональных возможностей: узкий (слабый) (Artificial Narrow Intelligence, ANI), общий (сильный) (Artificial General Intelligence, AGI) и суперсильный (Artificial Super Intelligence, ASI) [16, 17]. Слабый искусственный интеллект ориентирован на интеллектуальное выполнение конкретных задач, и функционирует в рамках заранее сформированного набора правил. Сильный искусственный интеллект обладает способностью к самостоятельному обучению и решению различных задач, а также имеет самосознание. Суперсильный искусственный интеллект представляет собой теоретически возможный искусственный интеллект, который превосходит человеческий, способен к решению сложных проблем, мышлению, эмоциям. В настоящее время реализован только слабый искусственный интеллект, который, как правило, разделяют на два вида: традиционный и генеративный. Разделение, в большей степени, связано с появлением генеративных моделей искусственного интеллекта. В одной из первых работ, посвященных этой тематике, авторы предлагают новый алгоритм машинного обучения без учителя, основанный на использовании двух искусственных нейронных сетей, между которыми происходит состязательный процесс, заключающийся в том, что одна сеть генерирует образы, а другая - отделяет правильные образы от неправильных [18]. Такая модель получила название генеративно-состязательная сеть (Generative Adversarial Network, GAN). Примером генеративного искусственного интеллекта является ChatGPT. Отличительной чертой генеративного искусственного интеллекта от традиционного является его возможность создавать новые тексты, изображения, аудио- и видеoinформацию. Интеллектуальные системы, построенные на основе традиционного искусственного интеллекта, эффективно используются для анализа данных и составления прогнозов - это голосовые помощники, рекомендательные и поисковые системы. Они обучены следовать заданным правилам и выполнять определенную работу, но они не создают ничего нового. Технологии искусственного интеллекта внедряются во многие сферы деятельности, в том числе, и в область защиты информации.

В ходе исследования составлен список задач информационной безопасности, которые представляют основные направления в обеспечении комплексной защиты информационных систем и ресурсов [19]; охватывают широкий спектр проблем безопасности - от выявления и предотвращения атак до анализа поведения пользователей и управления инцидентами. Сосредоточенность на этих задачах обусловлена их критической важностью для минимизации рисков, своевременного реагирования на угрозы и обеспечения непрерывности бизнес-процессов. Своевременное и надежное решение подобных задач особенно актуально для предприятий, работающих в сфере ИТ, финансовом и государственном секторах, здравоохранении, энергетике и транспорте. Список стратегически важных задач обеспечения информационной безопасности предприятий, с описанием возможных функций искусственного интеллекта в их решении:

1. Обнаружение и предотвращение вторжений. Функция искусственного интеллекта - анализ сетевого трафика с минимизацией времени выявления подозрительных событий. Позволит сократить время реагирования на потенциальные угрозы от злоумышленников.

2. Анализ угроз. Функция искусственного интеллекта - обработка относительно больших объемов данных об атаках и уязвимостях с целью выявления закономерностей. Позволит предприятиям выполнять прогнозирование изменения списков актуальных угрозы информационной безопасности.

3. Обнаружение вирусного программного обеспечения. Функция искусственного интеллекта - распознавание вирусных программ не по известным сигнатурам, а на основе особенностей их поведения.

4. Управление доступом. Функция искусственного интеллекта - реализация интеллектуальных систем аутентификации, которые наблюдают за поведением пользователей и обеспечивают доступ к соответствующим ресурсам, а также дополнительно могут выполнять отслеживание действий пользователей в реальном времени для выявления

подозрительных или аномальных действий. Это позволит уменьшить вероятности успешной реализации внутренних угроз информационной безопасности.

5. Анализ рисков. Функция искусственного интеллекта - оценка вероятностей угроз, размеров потенциального ущерба и рисков информационной безопасности.

6. Управление инцидентами. Функция искусственного интеллекта - анализ событий информационной безопасности, выявление инцидентов с минимизацией времени и с учетом правил реагирования на инциденты (оповещение ответственных лиц, сохранение доказательств для последующего проведения расследования и нахождения виновных).

Решению задачи разработки и внедрения интеллектуальных систем защиты информации посвящено множество научно-исследовательских проектов, научных статей и диссертационных исследований. Так, в работе [20] выполнен анализ возможностей методов машинного обучения для обеспечения информационной безопасности. Авторы предлагают варианты применения искусственного интеллекта для решения таких задач информационной безопасности, например, как анализ логов, построение систем обнаружения вторжений, защита от фишинга, анализ поведения пользователей.

В статье [21] авторы предложили использовать искусственные нейронные сети для автоматического выявления аномалий в сетевом трафике, что стало основой для систем обнаружения вторжений (Intrusion Detection System, IDS) на базе технологии искусственного интеллекта. Идея заключалась в обучении искусственных нейронных сетей распознавать нормальное поведение сети и выявлять отклонения, указывающие на возможные атаки. Авторы работы [22] описывают платформу MADAM ID, которая использует методы интеллектуального анализа данных и машинного обучения для автоматического извлечения признаков из данных аудита системы и построения моделей обнаружения вторжений на основе этих признаков. Идеи статьи активно реализуются в современных системах обнаружения (IDS) и предупреждения вторжений (Intrusion Prevention System, IPS), облачных платформах, промышленных системах и инструментах кибербезопасности для автоматического обнаружения сложных угроз с помощью машинного обучения.

В работе [23] представлена гибридная структура искусственного интеллекта на основе биологических технологий для кибербезопасности, которая основана на методах машинного обучения, и подходящая для защиты критически важных сетевых приложений в военных информационных системах. В статье [24] авторы предлагают интегрированную структуру inTIME на основе машинного обучения, которая позволяет специалистам по безопасности работать с данными по угрозам информационной безопасности, собирать, используя различные источники информации, проводить анализ, обмениваться. Эта платформа не требует администрирования, имеет открытый исходный код. В исследовании [25] представлена методология TTPXHunter для автоматизированного получения информации об угрозах в виде тактик, техник и процедур (Tactics, Techniques, and Procedures, TTP) из отчетов о реализованных угрозах. Методология основана на модели обработки естественного языка, которая обучена для нахождения и выделения данных об угрозах в текстах отчетов. Авторы указывают, что на тестовых данных система достигает высокой точности (f1-score около 92-97%), что показывает ее эффективность по сравнению с существующими методами. В исследовании [26] авторы описывают практический опыт применения машинного обучения для преобразования неструктурированных текстов об отчетах по угрозам безопасности в структурированные данные, которые содержат техники атак. Авторы сформулировали выводы о том, какие модели работают эффективнее, и какие еще задачи в этой области предстоит решить. Работа [27] представляет собой обширный обзор современных методов глубокого обучения, применяемых для обнаружения вредоносного программного обеспечения. Информация, представленная в этой статье, является полезным источником для теоретических и практических специалистов в области информационной безопасности. Также в статье рассматриваются имеющиеся проблемы и задачи требующие решения в области глубокого обучения в контексте обнаружения вредоносного кода. В работе [28] разрабатывается система обнаружения вредоносных программ, использующая

методологии глубокого обучения и отбора признаков. В исследовании использованы два набора данных о сетевом трафике, содержащие вредоносный и нормальный трафик. Использован метод корреляционного отбора признаков, чтобы уменьшить размерность данных, а затем выполнено обучение с использованием моделей глубокого обучения. Результаты, которые предоставляют авторы, показывают, что в некоторых сценариях уменьшение числа признаков почти не влияет на качество обнаружения вредоносного программного обеспечения. В статье [29] авторы разработали модификацию искусственной нейронной сети для обнаружения и классификации вредоносного программного обеспечения с использованием механизмов внимания на базе модели ResNeXt. Модель, которую назвали ResNeXt+, обучается фокусироваться на признаках вредоносного кода. Эксперименты показали, что ResNeXt+ превосходит существующие методы по точности обнаружения и классификации вредоносного кода при тестировании на различных наборах данных.

Статья [30] посвящена разработке механизма принятия решений по управлению доступом с использованием методов машинного обучения. Авторы предлагают схему под названием EPDE-ML (Efficient Permission Decision Engine based on Machine Learning), которая преобразует запросы на управление доступом, основанные на атрибутах, в вектор решений о разрешении или отказе, превращая задачу управления доступом в задачу бинарной классификации (разрешить или запретить доступ). В качестве алгоритма классификации используется случайный лес (Random Forest, RF). Авторы утверждают, что эксперименты показали относительно высокую точность (около 92,6%) разработанного механизма, и высокую производительность при увеличении масштаба политики доступа.

В работе [31] авторы предлагают новую модель Attribute/Behavior-Based Access Control, которая использует не только атрибуты пользователей и ресурсов, но и их поведенческие характеристики, извлеченные из лог-файлов. В статье описывается метод построения признаков поведения пользователя и применение алгоритмов машинного обучения для обучения и тестирования модели на базе данных из репозитория машинного обучения UCI. Результаты экспериментов показывают, что предложенная модель обладает высокой точностью и эффективностью в выявлении пользователей с аномальным поведением. Исследование [32] посвящено разработке комплексного подхода к оценке рисков информационной безопасности с использованием методов многокритериального принятия решений (Multi-Criteria Decision Making, MCDM) и машинного обучения. Используется техника, которая позволяет экспертам учитывать различные критерии и выражать свои оценки на естественном языке. Также в этом исследовании, дополнительно к MCDM-методам, применяются алгоритмы машинного обучения для предсказания типов атак.

В работе [33] авторы разработали новую гибкую модель оценки рисков информационной безопасности, которая объединяет стандарты, экспертные знания, машинное обучение и онтологическое моделирование. Модель использует кластерный анализ (метод k-means) для выявления скрытых паттернов в данных о рисках, и создает иерархическую структуру рисков с помощью онтологий для их более точной классификации. Для визуализации результатов и выполнения анализа рисков авторы предлагают использовать тепловые карты, что позволяет специалистам выявить взаимосвязи и приоритеты угроз.

В работе [34] разработана система управления инцидентами для критической инфраструктуры, основанная на искусственном интеллекте и дополненной реальности. Система использует несколько модулей и видеопотоки от камер видеонаблюдения для обнаружения угроз и передачи информации на место происшествия и в центр управления. Внедрение этой системы и тестирование в реальных условиях позволило пересмотреть стандартные процедуры безопасности. В работе [35] авторы описывают агентную систему искусственного интеллекта LLexus, которая предназначена для автоматизации процесса реализации инструкций по устранению неисправностей в облачных сервисах. Как правило, инженеры выполняют сложные трудоемкие инструкции. Разработанная система должна понимать необходимую последовательность действий, и позволят укорить восстановление работы сервиса, снизить нагрузку на инженеров.

Обсуждение результатов. Результаты проведенного анализа сформированы в табл. 1, в виде задач информационной безопасности с описанием применяемых для их решения методов искусственного интеллекта и возможными источниками исходных данных.

Таблица 1. Методы искусственного интеллекта в задачах защиты информации
Table 1. Artificial intelligence methods in information security tasks

Задача защиты информации The task of information security	Методы искусственного интеллекта Methods of artificial intelligence	Источник данных Data source
Обнаружение и предотвращение вторжений Intrusion detection and prevention	Долгая краткосрочная память (Long Short-Term Memory, LSTM): анализ временных последовательностей сетевого трафика для выявления аномалий и атак [36]. Автоэнкодеры (Autoencoders, AE): выявление аномалий в сетевых данных [37]. Градиентный бустинг (Gradient Boosting Machines, GBM): классификация событий на нормальные и подозрительные [38]. Изоляционный лес (Isolation Forest, IF): обнаружение аномалий [39]. Кластеризация HDBSCAN: выявление аномальных групп трафика [40]. Трансформеры (Transformers): обработка последовательностей логов для выявления сложных паттернов [41]	Исторические данные о сетевом трафике - логи сетевого трафика, системы мониторинга
Анализ угроз Threat Analysis	LSTM: анализ последовательностей событий и текстов отчетов, выявление временных зависимостей и паттернов в данных [42]. Сверточные нейронные сети (Convolutional Neural Networks, CNN): извлечение признаков из структурированных данных и текстов, представленных в виде числовых массивов (тензоров) [43]. GBM: классификация типов угроз на основе извлеченных признаков [44]. Обработка естественного языка (Natural Language Processing, NLP): анализ текстов отчетов и описаний угроз [45]	Данные о предыдущих атаках и уязвимостях — базы данных о кибератаках, отчеты о безопасности
Обнаружение вирусного программного обеспечения Detection of virus software	LSTM и CNN: анализатор журналов, API-мониторинг [46]. AE: выявление аномалий в поведении программного обучения [47]. GBM: классификация вредоносных и нормальных программ [48]. IF: выявление аномалий [49]	Данные о вредоносном программном обеспечении, поведение программ — антивирусные базы данных, данные о поведении приложений
Управление доступом Access control	Случайный лес (Random Forest, RF): классификация событий доступа [30]. LSTM: анализ последовательностей действий пользователей (User Behavior Analytics, UBA) [50]. Биометрические модели на основе глубокого обучения (Deep Learning based Biometrics, DL Biometrics): распознавание и аутентификация по биометрическим данным [51, 52]	Данные о поведении пользователей — логи доступа, системы аутентификации
Анализ рисков Risk analysis	Байесовские сети (Bayesian Networks, BN): моделирование вероятностей возникновения рисков [53]. GBM: прогнозирование вероятности рисков [54]	Данные о прошлых инцидентах, уязвимостях, отчеты об инцидентах, базы данных уязвимостей
Управление инцидентами Incident Management	LSTM, RF: анализ последовательностей инцидентов, классификация инцидентов [55]. кластерный анализ (метод k-means): кластеризация инцидентов для выявления групп [56]. AE: обнаружение аномалий [57]. Обучение с подкреплением (Reinforcement Learning, RL): автоматизация реагирования на инциденты [58]. NLP: анализ текстовых описаний и отчетов по инцидентам [59]	Данные о событиях информационной безопасности логи инцидентов, системы уведомлений

Процесс разработки и введения в эксплуатацию интеллектуальной системы защиты информации состоит из следующих основных этапов:

- оценка текущего уровня защищенности информации предприятия: выполняется аудит систем безопасности и выявление уязвимостей в механизмах защиты;
- определение целей использования искусственного интеллекта и формулирование задач, для решения которых предназначена интеллектуальная система;
- выбор интеллектуального метода и инструментов построения системы;
- разработка интеллектуальной системы, ее адаптация и интеграция в информационную инфраструктуру предприятия;
- обучение и тестирование интеллектуальной системы;
- введение интеллектуальной системы в эксплуатацию: выполняется запуск системы в рабочем режиме, проводится мониторинг работы, и оптимизация параметров системы на основе полученных данных;
- обучение персонала принципам работы с новой системой;
- регулярный аудит системы, учет замечаний, требований пользователей и сотрудников службы безопасности.

Описанный обобщенный алгоритм внедрения технологий искусственного интеллекта в структуру системы информационной безопасности представлен на рис. 1.

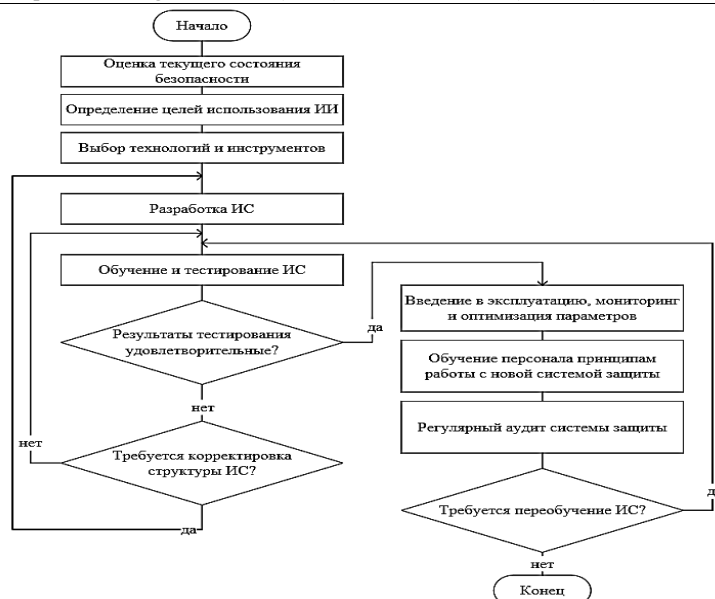


Рис. 1 – Обобщенный алгоритм внедрения технологий искусственного интеллекта в структуру системы информационной безопасности предприятия

Fig. 1 – Generalized algorithm for the implementation of artificial intelligence technologies into the structure of an enterprise's information security system

Необходимо принимать во внимание, что рассмотренные задачи информационной безопасности имеют свои отличительные особенности, которые необходимо учитывать при разработке и внедрении интеллектуальной системы защиты, и соответственно, включить дополнительные этапы в предлагаемый алгоритм:

- для решения задачи обнаружения и предотвращения вторжений необходимо выполнить специальную настройку системы для обеспечения минимизации ложных срабатываний;
- решение задачи анализа угроз требует разработки алгоритмов для анализа и выявления закономерностей;
- для решения задачи обнаружения вирусного программного обеспечения необходимо обеспечить минимизацию ложных срабатываний при выявлении вредоносных программ; потребуются обеспечить сбор и обработку обучающих данных, и разработать процедуры по обновлению моделей в реальном времени;
- в случае применения интеллектуальных методов для решения задачи управления доступом необходимо разработать систему аутентификации, которая должна учитывать особенности поведения пользователей, или физиологические признаки (в случае использования биометрической системы аутентификации). Также при анализе поведения пользователей необходимо разработать процедуры определения нормального поведения, и обеспечения конфиденциальности данных;
- решение задачи анализа рисков требует использования аналитических методов оценки потенциального ущерба от успешной реализации угроз безопасности;
- решение задачи управления инцидентами требует интеграции с системами оповещения о подозрительных событиях.

Вывод. Можно выделить перспективные подходы к развитию искусственного интеллекта для каждой из рассматриваемых задач защиты информации. В настоящее время подходы находятся на стадии активных исследований или пилотных проектов.

1. В области обнаружения и предотвращения вторжений дальнейшее развитие положительно будет связано с реализацией интеллектуальных систем, способных автоматически адаптировать тактику защиты под новые типы угроз. Теоретически это возможно осуществить с помощью генеративного искусственного интеллекта на основе моделей типа GAN для моделирования новых типов атак, и автоматической генерации сценариев защиты или вариационных автоэнкодеров (Variational Autoencoder, VAE) для выявления аномалий

в сетевом трафике, и глубоких нейронных сетей (Deep Learning) для адаптивного анализа поведения систем.

2. Перспективы в решении задачи анализа угроз связаны с построением интеллектуальных систем, предназначенных для прогнозирования возникновения новых угроз, уязвимостей и атак на компьютерные системы и сети. При этом необходимо использовать глубокое обучение, например, LSTM или трансформеры для анализа исторических данных об уязвимостях и предсказания новых угроз и модели машинного обучения для выявления закономерностей в данных об атаках.

3. Перспективное направление в решении задачи обнаружения вирусного программного обеспечения связано с построением самообучающихся систем, анализирующих поведение программ на основе обучающих данных, посредством глубокого обучения (например, CNN или RNN).

4. В области управления доступом перспективным является построение самообучающихся систем биометрической аутентификации (например, на базе глубокого обучения) и самообучающиеся биометрических систем, анализирующих поведение пользователей в реальном времени.

5. В области анализа рисков информационной безопасности перспективным направлением является построение генеративных моделей сценариев кризисных ситуаций с помощью моделей типа GAN или VAE и предсказания появления редких значимых событий (концепция «черный лебедь», The Black Swan) с помощью моделей предсказания на основе временных рядов (например, LSTM, Transformer).

6. Дальнейшее развитие методов решения задачи управления инцидентами может быть достигнуто путем внедрения систем, способных автоматически разрабатывать стратегии реагирования на атаки злоумышленников, а также самообучающихся аналитических систем для расследования инцидентов на базе обучения с подкреплением.

Одной из основных проблем, возникающих при внедрении технологий искусственного интеллекта в сферу информационной безопасности является задача назначения ответственных лиц в случае возникновения ошибок в работе интеллектуальных систем. Виновниками могут быть разработчики, организация, применяющая интеллектуальные средства или сама система. Поэтому необходимы четкие указания для формирования принципов определения ответственности, прописанные на законодательном уровне.

Другая проблема связана со специфическими особенностями интеллектуальных систем, основанных на процессах обучения. Такие системы, по сути, представляют собой «черный ящик», что затрудняет понимание того, каким образом они принимают решения. Это может вызвать недоверие к работе интеллектуальных систем защиты информации со стороны пользователей и государственных органов, курирующих вопросы обеспечения информационной безопасности в соответствии с действующим законодательством.

Еще одна проблема заключается в том, что интеллектуальные системы обучающиеся на данных уязвимы к атакам, направленным на манипулирование данными. В этом случае интеллектуальная система может принимать неверные решения, пройдя обучение на искаженных примерах. Рассмотренные специфические особенности технологий искусственного интеллекта и задач обеспечения защиты информации позволяют определить ряд рекомендаций, следование которым позволит снизить инвестиционные (экономические), кадровые и технические риски при развертывании интеллектуальных систем в целях информационной безопасности. В первую очередь необходимо разработать стратегию внедрения искусственного интеллекта, учитывающую потребности конкретного предприятия в области информационной безопасности. Проводить работы по внедрению поэтапно, начиная с пилотных проектов, чтобы оценить эффективность и выявить потенциальные проблемы.

Далее следует провести обучение сотрудников навыкам работы с интеллектуальной системой, разъяснить им назначение и принципы ее функционирования. Обязательно необходимо установить границы ответственности за действия интеллектуальных систем, включая юридические аспекты и внутренние регламенты. Руководство предприятия

и сотрудники службы безопасности должны обеспечить проведение регулярного аудита и обновления интеллектуальной системы с целью выявления уязвимостей, своевременного реагирования на изменения списка актуальных угроз информационной безопасности.

Важным является процесс сотрудничества с экспертами в областях информационной безопасности и технологий искусственного интеллекта для того, чтобы наполнить интеллектуальную систему соответствующими знаниями, и обеспечить прозрачность работы системы для понимания пользователями процессов принятия решений.

Внедрение технологий искусственного интеллекта в сферу информационной безопасности обеспечивает построение эффективных систем защиты, которые позволяют автоматизировать процессы мониторинга и реагирования на инциденты, такие системы могут адаптироваться к новым видам угроз посредством обучения, и реализуют проактивную защиту информационных ресурсов и систем. При этом необходимо обеспечить прозрачность работы систем и разработать процедуры определения ответственных лиц при принятии решений на основе результатов работы систем.

Библиографический список:

1. Шинкаревецкая Г.Г., Берман А.М. Кибератаки – Противоправное использование цифровых технологий // Международное право. 2022. № 1. С. 40-50. DOI: 10.25136/2644-5514.2022.1.37271 URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=37271
2. Указ Президента РФ от 10 октября 2019 г. № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» [Электронный ресурс] // ГАРАНТ. URL: <https://base.garant.ru/72838946/> (дата обращения: 21.03.2025)
3. ГОСТ Р 50922-2006. Защита информации. Основные термины и определения. – М.:Стандартинформ, 2008. 12 с.
4. Рекомендации по стандартизации Р 50.1.056-2005. Техническая защита информации. Основные термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2006. – 20 с.
5. ГОСТ Р 59710-2022. Защита информации. Управление компьютерными инцидентами. Общие положения. – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 16 с.
6. Миланович Е.А., Селезнёв И.Л. Система анализа сетевого трафика для обеспечения безопасности сети // Молодой ученый. – 2020. – № 15 (305). – С. 86-89. – URL: <https://moluch.ru/archive/305/68701/> (дата обращения: 21.03.2025).
7. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27002-2021. Информационные технологии. Методы и средства обеспечения безопасности. Свод норм и правил применения мер обеспечения информационной безопасности– М.: Стандартинформ, 2021. – 74 с.
8. Мещеряков Р.В., Мельников С.Ю., Пересыпкин В.А., Хорев А.А. Перспективные направления применения технологий искусственного интеллекта при защите информации//Вопросы кибербезопасности. 2024. № 4(62). DOI:10.21681/2311-3456-2024-4-02-12
9. Дартмутская конференция по искусственному интеллекту [Электронный ресурс]//Психология. – URL: <https://psixologiya.org/blog/2504-dartmutskaya-konferenciya-po-iskusstvennomu-intellektu.html> (дата обращения: 21.03.2025).
10. Что такое искусственный интеллект и его виды [Электронный ресурс] aisimple.ru: <https://aisimple.ru/22-chto-takoe-ii.html> (дата обращения: 21.03.2025).
11. Усамов И.Р. Роль интеллектуальных информационных систем в современном мире / И.Р. Усамов, А.А. Албакова, А.А. Мустиев // Актуальные вопросы современной науки: теория, технология, методология и практика: Материалы Международной научно-практической онлайн-конференции, приуроченной к 60-ти летию член-корреспондента Академии наук ЧР, доктора технических наук, профессора Сайид-Альви Юсуповича Муртазаева, Грозный, 28 апреля 2021 года. – Грозный: Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, 2021. – С. 267-272. – DOI 10.34708/GSTOU.CONF.2021.10.35.053. – EDN PMXCRD.
12. Рейнхард Клетте. Компьютерное зрение. Теория и алгоритмы /пер. с англ. А.А. Слинкин. М.: ДМК Пресс, 2019. – 506 с.: ил.
13. Прошина М.В. Современные методы обработки естественного языка: нейронные сети//Экономика строительства. 2022. № 5. <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-metody-obrabotki-estestvennogo-yazyka-neyronnye-seti>(дата обращения: 21.03.2025).
14. Tjandra, A., Sakti, S., & Nakamura, S. End-to-End Speech Recognition Sequence Training With Reinforcement Learning. IEEE Access, 2019;7:79758-79769.
15. Чечнев В.Б. Использование систем поддержки принятия решений в автоматизации процессов принятия решений. *Электронные библиотеки*. 2025;28(1):163-183. DOI 10.26907/1562-5419-2025-28-1-163-183. EDN OGRDVD.
16. Pohl J. Artificial Superintelligence: Extinction or Nirvana? InterSymp-2015. № 27 P. 1–20.
17. Илюшин Л.С., Н.А. Торпашева. Технологии искусственного интеллекта как ресурс трансформации образовательных практик Ярославский педагогический вестник. – 2024. – № 3(138). С. 62-71. DOI 10.20323/1813-145X-2024-3-138-62. EDN ADWMMG.
18. Goodfellow Ian, Pouget-Abadie Jean, Mirza Mehdi, Xu Bing, Warde-Farley David, Ozair Sherjil, Courville Aaron, Bengio Yoshua Generative Adversarial Nets.Proceedings of the International Conference on Neural Information Processing Systems. 2014;2672–2680.
19. Баланов А.Н. Комплексная информационная безопасность: учебное пособие для вузов. – 2-е изд., Санкт-Петербург: Лань, 2025, – 400 с.
20. Доргушаова А.К., Довгаль В.А., Козлова Н.Ш., Козлов Р.С. Обзор использования технологий машинного обучения в обеспечении информационной безопасности данных: настоящее и будущее //Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2024. – №1 (336). <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-ispolzovaniya-tehnologiy-mashinnogo-obucheniya-v-obespechenii-informatsionnoy-bezopasnosti-dannyh-nastoyashee-i-budushee> (дата обращения: 23.03.2025).
21. Mukkamala, S., Janoski, G.I., & Sung, A.H.Intrusion detection using neural networks and support vector machines. Proceedings of the 2002 International Joint Conference on Neural Networks. IJCNN'02 (Cat. No.02CH37290) 2002;2:1702-1707
22. Lee, W., & Stolfo, S. (2000). A framework for constructing features and models for intrusion detection systems. ACM Transactions on Information and System Security (TISSEC), 3, 227 - 261.
23. Demertzis, K., & Iliadis, L.S. (2015). A Bio-Inspired Hybrid Artificial Intelligence Framework for Cyber Security.
24. Koloveas, P., Chantzios, T., Alevizopoulou, S., Skiadopoulos, S., & Tryfonopoulos, C. (2021). inTIME: A Machine Learning-Based Framework for Gathering and Leveraging Web Data to Cyber-Threat Intelligence. Electronics.
25. Rani, N., Saha, B., Maurya, V., & Shukla, S.K. (2024). TTPXHunter: Actionable Threat Intelligence Extraction as TTPs from Finished Cyber Threat Reports. Digital Threats: Research and Practice, 5, 1 - 19.

26. Orbinato, V., Barbaraci, M., Natella, R., & Cotroneo, D. (2022). Automatic Mapping of Unstructured Cyber Threat Intelligence: An Experimental Study: (Practical Experience Report). 2022 IEEE 33rd International Symposium on Software Reliability Engineering (ISSRE), 181-192.
27. Ajvad Haneef K., Madhu Kumar S.D. (2023). Deep Learning Techniques for Malware Detection: A Comprehensive Survey. 2023 International Conference on Computer, Electronics & Electrical Engineering & their Applications (IC2E3), 1-7.
28. Alomari, E., Nuiia, R.R., Alyasseri, Z.A., Mohammed, H.J., Sani, N.S., Esa, M.I., & Musawi, B.A. (2023). Malware Detection Using Deep Learning and Correlation-Based Feature Selection. *Symmetry*, 15, 123.
29. He, Y., Kang, X., Yan, Q., & Li, E. (2024). ResNeXt+: Attention Mechanisms Based on ResNeXt for Malware Detection and Classification. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 19, 1142-1155.
30. Liu, A., Du, X., & Wang, N. (2021). Efficient Access Control Permission Decision Engine Based on Machine Learning. *Secur. Commun. Networks*, 2021, 3970485:1-3970485:11.
31. Afshar, M., Samet, S., & Usefi, H. (2021). Incorporating Behavior in Attribute Based Access Control Model Using Machine Learning. 2021 IEEE International Systems Conference (SysCon), 1-8.
32. Alqazzaz, A. (2024). Integrated Neutrosophic methodology and Machine Learning Models for Cybersecurity Risk Assessment: An exploratory study. *International Journal of Neutrosophic Science*.
33. Barlybayev, A., Sharipbay, A., Shakhmetova, G., & Zhumadillayeva, A. (2024). Development of a Flexible Information Security Risk Model Using Machine Learning Methods and Ontologies. *Applied Sciences*.
34. Nastou, P.E., Papataxiarhis, V., Moutsis, S.N., Tsintotas, K.A., Petroudis, G., Papastamatiou, N., Mesaritakis, C., Gasteratos, A., Vouyioukas, D., & Gavathas, P. (2024). An Efficient Highly-Secure AI-Based System for Incident Management in Critical Infrastructures. 2024 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST), 1-6.
35. Las-Casas, P.H., Kumbhare, A.G., Fonseca, R., & Agarwal, S. (2024). LLeXus: an AI agent system for incident management. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, 58, 23 - 36.
36. Harshitha, T.S. (2024). Intrusion Detection and Prevention Using CNN-LSTM. *International Journal of Science, Engineering and Technology*.
37. Alhassan, S., Abdul-Salaam, G., Micheal, A., Missah, Y.M., Ganaa, E.D., & Shirazu, A.S. (2024). CFS-AE: Correlation-based Feature Selection and Autoencoder for Improved Intrusion Detection System Performance. *J. Internet Serv. Inf. Secur.*, 14, 104-120.
38. Aualhaj, M.M., Abu-Shareha, A.A., & Rateb, R. (2025). Enhancing intrusion detection systems with hybrid HHO-WOA optimization and gradient boosting machine classifier. *International Journal of Reconfigurable and Embedded Systems (IJRES)*.
39. Maheswaran N., Bose S., Gokulraj G., Anitha T., Shruthi T., Vijayaraj G. (2025). Intrusion Prevention System in SDN Environment for 6G Networks Using Deep Learning. 2025 6th International Conference on Mobile Computing and Sustainable Informatics (ICMCSI), 53-61.
40. Sreenivasa Reddy, G., & Shyama Chandra Prasad, G. (2023). Intrusion detection system using clustering algorithms of neural networks. *International Journal of Advanced Research*.
41. Sana, L., Nazir, M.M., Yang, J., Hussain, L., Chen, Y., Ku, C.S., Alatiyyah, M.H., Alateyah, S.A., & Por, L.Y. (2024). Securing the IoT Cyber Environment: Enhancing Intrusion Anomaly Detection With Vision Transformers. *IEEE Access*, 12, 82443-82468.
42. Ravichandra A., Shivakumara T. (2023). Detecting and Real Time Threat Analysis in Smart Grid Networks. *Interantional journal of scientific research in engineering and management*.
43. Almutairi, L. (2023). Deep Learning based Frameworks for Real-time Cyber Threat Analysis. *Journal of Engineering and Applied Sciences*.
44. Xie, L., Liao, Z., & Li, H. (2024). Research and Design of an Automated Security Event Analysis and Handling Framework Based on Threat Intelligence. *Scalable Comput. Pract. Exp.*, 25, 1872-1881.
45. Mohammed, S.Y., & Aljanabi, M. (2024). From Text to Threat Detection: The Power of NLP in Cybersecurity. *SHIFRA*.
46. Karat, G., Kannimoola, J.M., Nair, N., Vazhayil, A., G, S.V., & Poornachandran, P. (2024). CNN-LSTM Hybrid Model for Enhanced Malware Analysis and Detection. *Procedia Computer Science*.
47. Beg, R., Pateriya, R.K., & Tomar, D.S. (2024). Design of an Iterative Method for Malware Detection Using Autoencoders and Hybrid Machine Learning Models. *IEEE Access*, 12, 175032-175055.
48. Iqbal, A., & Payal, A. (2024). Malware Detection Technique for Android Devices Using Machine Learning Algorithms. 2024 International Conference on Computing, Sciences and Communications (ICCCS), 1-6.
49. Pawar, J., Avhankar, M.S., Gupta, A., Barve, A., Patil, H., & Maranan, R. (2024). Enhancing Network Security: Leveraging Isolation Forest for Malware Detection. 2024 2nd International Conference on Advancement in Computation & Computer Technologies (InCACCT), 230-234.
50. Zhao, G., Li, X., & Li, H. (2024). A Trusted Authentication Scheme Using Semantic LSTM and Blockchain in IoT Access Control System. *International Journal on Semantic Web and Information Systems*.
51. Vincent, A., & Anitha, A. (2023). A Survey on Deep Learning Approach for Identity Recognition Using Finger Vein Biometrics. 2023 International Conference on Circuit Power and Computing Technologies (ICCPCT), 971-975.
52. Mounnan, O., Manad, O., Boubchir, L., Mouatasim, A.E., & Daachi, B. (2022). Deep Learning-Based Speech Recognition System using Blockchain for Biometric Access Control. 2022 Ninth International Conference on Software Defined Systems (SDS), 1-2.
53. Sato, R., Kawaguchi, H., & Nakatani, Y. (2025). Malcode: Practical and Stochastic Security Risk Assessment for Enterprise Networks. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 22, 1383-1399.
54. Ngampunprasert, T., & Ketcham, M. (2024). Risk Analysis of Device Within the Organization that are Vulnerable to Cyber Security Attacks with Artificial Intelligence. 2024 IEEE International Conference on Cybernetics and Innovations (ICCI), 1-6.
55. Mohanraj, G., Nadesh, R.K., J, J., S, A., & Sathiyamoorthi, V. (2025). Monitoring Incident Response Using Real-Time Analytics. 2024 International Conference on IT Innovation and Knowledge Discovery (ITIKD), 1-8.
56. Anggraeni, R., Alzami, F., Nurhindarto, A., Budi, S., Megantara, R.A., Rizqa, I., & Muslih, M. (2025). Clustering IT Incidents Using K-Means: Improving Incident Response Time in Service Management. *Sinkron*.
57. Сафронов Д.А., Кацер Ю.Д., Зайцев К.С. Поиск аномалий с помощью автоэнкодеров. //International Journal of Open Information Technologies. 2022.№8. <https://cyberleninka.ru/article/n/poisk-anomaliy-s-pomoschyu-avtoenkoderov> (дата обращения: 13.07.2025).
58. Hossain, F., Hasan, K., Amin, A., & Mahmud, S. (2024). Quantum Machine Learning for Enhanced Cybersecurity: Proposing a Hypothetical Framework for Next-Generation Security Solutions. *Journal of Technologies Information and Communication*.
59. Faheem, M., Awais, M., Iqbal, A., & Zia, H. (2025). Enhancing It incident management with natural language processing and predictive analytics. *International Journal of Science and Research Archive*.

References:

1. Shinkaretskaya G.G., Berman A.M. Cyberattacks – Criminal Use of Digital Technologies // *International Law*. 2022. No. 1. P. 40-50. DOI: 10.25136/2644-5514.2022.1.37271. URL: <https://nbpublish.com/libraryreadarticle.php?id=37271>
2. Decree of the President of the Russian Federation dated October 10, 2019 No. 490 «On the Development of Artificial Intelligence in the Russian Federation» [Electronic resource] // GARANT. <https://base.garant.ru/72838946/> (accessed: 21.03.2025)
3. GOST R 50922-2006. Information Protection. Basic Terms and Definitions. – Moscow: Standartinform, 2008. – 12 p.
4. Recommendations for Standardization R 50.1.056-2005. Technical Protection of Information. Basic Terms and Definitions. – Moscow: Standartinform, 2006. – 20 p.

5. GOST R 59710-2022. Information Protection. Management of Computer Incidents. General Provisions. – Moscow: Russian Institute for Standardization, 2022. – 16 p.
6. Milanovich E.A., Seleznev I.L. System for Analyzing Network Traffic to Ensure Network Security // *Young Scientist*. 2020. No. 15 (305). P. 86-89. URL: <https://moluch.ru/archive/305/68701/> (accessed: 21.03.2025)
7. GOST R ISO/IEC 27002-2021. Information Technology. Security Techniques. Code of Practice for Information Security Controls. – Moscow: Standartinform, 2021. – 74 p.
8. Meshcheryakov R.V., Melnikov S.Yu., Peresypkin V.A., Khorev A.A. Promising Areas for the Application of Artificial Intelligence Technologies in Information Protection // *Cybersecurity Issues*. 2024; 4(62). DOI: 10.21681/2311-3456-2024-4-02-12
9. Dartmouth Conference on Artificial Intelligence [Electronic resource] // *Psychology*. – URL: <https://psixologiya.org/blog/2504-dartmuskaya-konferenciya-po-iskusstvennomu-intellektu.html> (accessed: 21.03.2025)
10. What is Artificial Intelligence and Its Types [Electr.resource]aisimple.ru. <https://aisimple.ru/22-cto-takoe-ii.html> (access.: 21.03.2025)
11. Usamov I.R., A.A. Albakova, A.A. Mustiev. The Role of Intelligent Information Systems in the Modern World. Current Issues of Modern Science: Theory, Technology, Methodology, and Practice: Materials of the International Scientific and Practical Online Conference Dedicated to the 60th Anniversary of Corresponding Member of the Academy of Sciences of the Chechen Republic, Dr. of Technical Sciences, Prof. Said-Alvi Yusupovich Murtazayev, Grozny, April 28, 2021. Grozny: Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov, 2021; 267-272. DOI: 10.34708/GSTOU.CONF..2021.10.35.053. EDN PMXCRD.
12. Reinhard Klette. Computer Vision. Theory and Algorithms. Translated from English by A.A. Slinkin. Moscow: DMK Press, 2019:506.
13. Proshina M.V. Modern Methods of Natural Language Processing: Neural Networks // *Construction Economics*. 2022; 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-metody-obrabotki-estestvennogo-yazyka-neyronnye-seti> (accessed: 21.03.2025)
14. Tjandra, A., Sakti, S., Nakamura, S. End-to-End Speech Recognition Sequence Training With Reinforcement Learning. *IEEE Access*, 2019; 7:79758-79769.
15. Chechnev V.B. Use of Decision Support Systems in Decision-Making Automation. *Electronic Libraries*. 2025; 28(1):163-183. – DOI: 10.26907/1562-5419-2025-28-1-163-183. – EDN OGRDVD.
16. Pohl J. Artificial Superintelligence: Extinction or Nirvana? *InterSymp-2015*; 27:1–20.
17. Ilyushin L.S., Torpashova N.A. Artificial Intelligence Technologies as a Resource for Transforming Educational Practices. *Yaroslavl Pedagogical Bulletin*. 2024; 3(138): 62-71. – DOI: 10.20323/1813-145X-2024-3-138-62. – EDN ADWMMG.
18. Goodfellow Ian, Pouget-Abadie Jean, Mirza Mehdi, Xu Bing, Warde-Farley David, Ozair Sherjil, Courville Aaron, Bengio Yoshua Generative Adversarial Nets. *Proceedings of the International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2014)*; 2672–2680.
19. Balanov A.N. Comprehensive Information Security: Textbook for Higher Education Institutions. Saint Petersburg: Lan. 2025; 400.
20. Dorgushaeva A.K., Dovgal V.A., Kozlova N.Sh., Kozlov R.S. Review of the Use of Machine Learning Technologies in Ensuring Data Information Security: Present and Future // *Bulletin of Adyghe State University. Series 4: Natural-Mathematical and Technical Sciences*. 2024. No. 1 (336). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-ispolzovaniya-tehnologiy-mashinnogo-obucheniya-v-obespechenii-informatsionnoy-bezopasnosti-dannyh-nastoyaschee-i-budushee> (accessed: 23.03.2025)
21. Mukkamala, S., Janoski, G.I., & Sung, A.H. (2002). Intrusion detection using neural networks and support vector machines. *Proceedings of the 2002 International Joint Conference on Neural Networks. IJCNN'02* (Cat. No.02CH37290), 2, 1702-1707 vol.2.
22. Lee, W., & Stolfo, S. (2000). A framework for constructing features and models for intrusion detection systems. *ACM Transactions on Information and System Security (TISSEC)*, 3, 227 - 261.
23. Demertzis, K., & Iliadis, L.S. (2015). A Bio-Inspired Hybrid Artificial Intelligence Framework for Cyber Security.
24. Koloveas, P., Chantzios, T., Alevizopoulou, S., Skiadopoulos, S., & Tryfonopoulos, C. (2021). inTIME: A Machine Learning-Based Framework for Gathering and Leveraging Web Data to Cyber-Threat Intelligence. *Electronics*.
25. Rani, N., Saha, B., Maurya, V., & Shukla, S.K. (2024). TTPXHunter: Actionable Threat Intelligence Extraction as TTPs from Finished Cyber Threat Reports. *Digital Threats: Research and Practice*, 5, 1 - 19.
26. Orbinato, V., Barbaraci, M., Natella, R., & Cotronero, D. Automatic Mapping of Unstructured Cyber Threat Intelligence: An Experimental Study: (Practical Experience Report). *IEEE 33rd International Symposium on Software Reliability Engineering (ISSRE)*, 2022; 181-192.
27. Ajvad Haneef K., Madhu Kumar S.D. Deep Learning Techniques for Malware Detection: A Comprehensive Survey. *2023 International Conference on Computer, Electronics & Electrical Engineering & their Applications (IC2E3)*, 2023; 1-7.
28. Alomari, E., Nuiaa, R.R., Alyasseri, Z.A., Mohammed, H.J., Sani, N.S., Esa, M.I., & Musawi, B.A. Malware Detection Using Deep Learning and Correlation-Based Feature Selection. *Symmetry*, 2023; 15, 123.
29. He, Y., Kang, X., Yan, Q., & Li, E. (2024). ResNeXt+: Attention Mechanisms Based on ResNeXt for Malware Detection and Classification. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 19, 1142-1155.
30. Liu, A., Du, X., & Wang, N. (2021). Efficient Access Control Permission Decision Engine Based on Machine Learning. *Secur. Commun. Networks*, 2021, 3970485:1-3970485:11.
31. Afshar, M., Samet, S., & Usefi, H. (2021). Incorporating Behavior in Attribute Based Access Control Model Using Machine Learning. *2021 IEEE International Systems Conference (SysCon)*, 1-8.
32. Alqazzaz, A. Integrated Neutrosophic methodology and Machine Learning Models for Cybersecurity Risk Assessment: An exploratory study. *International Journal of Neutrosophic Science*. 2024.
33. Barlybayev, A., Sharipbay, A., Shakhmetova, G., & Zhumadillayeva, A. Development of a Flexible Information Security Risk Model Using Machine Learning Methods and Ontologies. *Applied Sciences*. 2024.
34. Nastou, P.E., Papataxiarhis, V., Moutsis, S.N., Tsintotas, K.A., Petroudis, G., Papastamatiou, N., Mesaritakis, C., Gasteratos, A., Vouyioukas, D., & Gavathas, P. (2024). An Efficient Highly-Secure AI-Based System for Incident Management in Critical Infrastructures. *2024 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST)*, 1-6.
35. Las-Casas, P.H., Kumbhare, A.G., Fonseca, R., & Agarwal, S. LLexus: an AI agent system for incident management. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, 2024; 58: 23 - 36.
36. Harshitha, T.S. Intrusion Detection and Prevention Using CNN-LSTM. *International Journal of Science, Engineering and Technology*. 2024.
37. Alhassan, S., Abdul-Salaam, G., Micheal, A., Missah, Y.M., Ganaa, E.D., & Shirazu, A.S. (2024). CFS-AE: Correlation-based Feature Selection and Autoencoder for Improved Intrusion Detection System Performance. *J. Internet Serv. Inf. Secur.*, 14, 104-120.
38. Abualhaj, M.M., Abu-Shareha, A.A., & Rateb, R. (2025). Enhancing intrusion detection systems with hybrid HHO-WOA optimization and gradient boosting machine classifier. *International Journal of Reconfigurable and Embedded Systems (IJRES)*.
39. Maheswaran N., Bose S., Gokulraj G., Anitha T., Shruthi T., Vijayaraj G. (2025). Intrusion Prevention System in SDN Environment for 6G Networks Using Deep Learning. *6th International Conference on Mobile Computing and Sustainable Informatics (ICMCSI)*, 2025; 53-61.
40. Sreenivasa Reddy, G., & Shyama Chandra Prasad, G. (2023). Intrusion detection system using clustering algorithms of neural networks. *International Journal of Advanced Research*.
41. Sana, L., Nazir, M.M., Yang, J., Hussain, L., Chen, Y., Ku, C.S., Alatiyyah, M.H., Alateyah, S.A., & Por, L.Y. (2024). Securing the IoT Cyber Environment: Enhancing Intrusion Anomaly Detection With Vision Transformers. *IEEE Access*, 12, 82443-82468.
42. Ravichandra A., Shivakumara T. (2023). Detecting and Real Time Threat Analysis in Smart Grid Networks. *Interantional journal of scientific research in engineering and management*.
43. Almutairi L Deep Learning based Frameworks for Real-time Cyber Threat Analysis. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2023.

44. Xie, L., Liao, Z., & Li, H. (2024). Research and Design of an Automated Security Event Analysis and Handling Framework Based on Threat Intelligence. *Scalable Comput. Pract. Exp.*, 25, 1872-1881.
45. Mohammed, S.Y., & Aljanabi, M. (2024). From Text to Threat Detection: The Power of NLP in Cybersecurity. *SHIFRA*.
46. Karat, G., Kannimoola, J.M., Nair, N., Vazhayil, A., G, S.V., & Poornachandran, P. (2024). CNN-LSTM Hybrid Model for Enhanced Malware Analysis and Detection. *Procedia Computer Science*.
47. Beg, R., Pateriya, R.K., & Tomar, D.S. (2024). Design of an Iterative Method for Malware Detection Using Autoencoders and Hybrid Machine Learning Models. *IEEE Access*, 12, 175032-175055.
48. Iqbal, A., & Payal, A. (2024). Malware Detection Technique for Android Devices Using Machine Learning Algorithms. *2024 International Conference on Computing, Sciences and Communications (ICCSC)*, 1-6.
49. Pawar, J., Avhankar, M.S., Gupta, A., Barve, A., Patil, H., & Maranan, R. Enhancing Network Security: Leveraging Isolation Forest for Malware Detection. *2024 2nd International Conference on Advancement in Computation & Computer Technologies (InCACCT)*, 2024;230-234.
50. Zhao, G., Li, X., & Li, H. (2024). A Trusted Authentication Scheme Using Semantic LSTM and Blockchain in IoT Access Control System. *International Journal on Semantic Web and Information Systems*.
51. Vincent, A., & Anitha, A. (2023). A Survey on Deep Learning Approach for Identity Recognition Using Finger Vein Biometrics. *2023 International Conference on Circuit Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, 971-975.
52. Mounnan, O., Manad, O., Boubchir, L., Mouatasim, A.E., & Daachi, B. (2022). Deep Learning-Based Speech Recognition System using Blockchain for Biometric Access Control. *2022 Ninth International Conference on Software Defined Systems (SDS)*, 1-2.
53. Sato, R., Kawaguchi, H., & Nakatani, Y. (2025). Malcode: Practical and Stochastic Security Risk Assessment for Enterprise Networks. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 22, 1383-1399.
54. Ngampunprasert, T., & Ketcham, M. (2024). Risk Analysis of Device Within the Organization that are Vulnerable to Cyber Security Attacks with Artificial Intelligence. *2024 IEEE International Conference on Cybernetics and Innovations (ICCI)*, 1-6.
55. Mohanraj, G., Nadesh, R.K., J, J., S, A., & Sathiyamoorthi, V. (2025). Monitoring Incident Response Using Real-Time Analytics. *2024 International Conference on IT Innovation and Knowledge Discovery (ITIKD)*, 1-8.
56. Anggraeni, R., Alzami, F., Nurhindarto, A., Budi, S., Megantara, R.A., Rizqa, I., & Muslih, M. (2025). Clustering IT Incidents Using K-Means: Improving Incident Response Time in Service Management. *Sinkron*.
57. Safronov D.A., Katser Y.D., Zaitsev K.S. Anomaly Detection Using Autoencoders // *International Journal of Open Information Technologies*. 2022. No. 8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poisk-anomaly-s-pomoschyu-avtoenkoderov> (accessed: 13.07.2025).
58. Hossain, F., Hasan, K., Amin, A., & Mahmud, S. (2024). Quantum Machine Learning for Enhanced Cybersecurity: Proposing a Hypothetical Framework for Next-Generation Security Solutions. *Journal of Technologies Information and Communication*.
59. Faheem, M., Awais, M., Iqbal, A., & Zia, H. (2025). Enhancing It incident management with natural language processing and predictive analytics. *International Journal of Science and Research Archive*.

Сведения об авторах:

Потененко Даниил Анатольевич, магистрант, кафедра «Вычислительные системы и информационная безопасность»; potienkodaniil@gmail.com

Чмыхало Данил Сергеевич, магистрант, кафедра «Вычислительные системы и информационная безопасность»; chmykhalo3009@gmail.com

Легонько Ольга Леонидовна кандидат технических наук, доцент, кафедра «Вычислительные системы и информационная безопасность», olga_cvetkova@mail.ru; ORCID 0000-0003-4071-6313

Information about authors:

Daniil A. Potienko, Master's student, Department of Computing Systems and Information Security; potienkodaniil@gmail.com

Danil S. Chmykhalo, Master's student, Department of Computing Systems and Information Security; chmykhalo3009@gmail.com

Olga L. Legonko, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Computing Systems and Information Security, olga_cvetkova@mail.ru; ORCID 0000-0003-4071-6313

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 03.04.2025.

Одобрена после рецензирования/Reviced 29.11.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 14.01.2026.

Оптимизационная сетевая модель нахождения максимального потока сети при управлении облачными ресурсами

С.В. Разумников

Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского
Томского политехнического университета (ЮТИ ТПУ),
652055, г. Юрга, ул. Ленинградская 26, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка оптимизационной сетевой модели максимизации объема передаваемых данных при соблюдении критериев качества при управлении облачными ресурсами. **Метод.** Исследование основано на применении классической теории графов (алгоритм Форда-Фалкерсона) и многокритериальной оптимизации, дополненных логарифмическим методом нормализации данных. **Результат.** Разработанная модель представляет эффективный подход к оптимизации потока данных в облачной среде, позволяющий определить оптимальный маршрут передачи данных между узлами сети, учитывая ограничения ресурсов и требования к производительности. Определены основные принципы и алгоритм модели, а также представлены примеры ее применения в реальных сценариях управления облачными ресурсами. **Вывод.** Сетевая модель является важным инструментом для эффективного управления облачными ресурсами, оптимизации потоков данных и обеспечения высокой производительности приложений.

Ключевые слова: сетевая модель, управление, оптимизация, облачные ресурсы, поток сети

Для цитирования: С.В. Разумников. Оптимизационная сетевая модель нахождения максимального потока сети при управлении облачными ресурсами. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(1):170-185. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-170-185.

Optimization network model for finding the maximum network flow in cloud resource management

S.V. Razumnikov

Yurga Technological Institute (branch) of the National Research Tomsk Polytechnic University,
26 Leningradsкая St., Yurga 652055, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop an optimization network model for maximizing the volume of transmitted data while meeting the quality criteria for cloud resource management. **Method.** The study is based on classical graph theory (the Ford-Fulkerson algorithm) and multi-criteria optimization, supplemented by a logarithmic data normalization method. **Result.** The model presents an effective approach to optimizing data flow in a cloud environment, enabling the determination of the optimal data transfer route between network nodes, taking into account resource constraints and performance requirements. The principles and algorithm of the model are defined; examples of application in cloud resource management are given. **Conclusion.** The network model is an important tool for efficiently managing cloud resources, optimizing data flows and ensuring high application performance.

Keywords: network model, management, optimization, cloud resources, network flow

For citation: S.V. Razumnikov. Optimization network model for finding the maximum network flow in cloud resource management. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):170-185. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-170-185.

Введение. Облачные вычисления стали неотъемлемой частью современной цифровой экономики. Они предоставляют гибкость и масштабируемость, позволяя компаниям и организациям эффективно управлять своими данными и приложениями. Однако, управление облачными ресурсами может быть сложной задачей, особенно при необходимости оптимизации потока данных в сети [1-4]. В этой статье рассмотрена оптимизационная сетевая модель, которая позволит найти максимальный поток сети при управлении облачными ресурсами.

Сетевая модель оптимизации потока данных в облачной среде представляет собой сложную задачу, требующую учета множества факторов, таких как пропускная способность каналов связи, задержки и ограничения ресурсов [5-7]. Для решения этой задачи используются различные алгоритмы и методы, включая алгоритмы поиска максимального потока. В [8-11] представлены примеры применения сетевых моделей в управлении топливно-энергетической системой, в сетевых системах, в анализе распределения предельных нагрузок в многопользовательской сети. Рассматриваемая модель представляет собой эффективный подход к оптимизации потока данных в облачной среде. Она позволяет определить оптимальный маршрут передачи данных между узлами сети, учитывая ограничения ресурсов и требования к производительности.

Постановка задачи. В статье рассмотрены основные принципы и алгоритмы оптимизационной сетевой модели нахождения максимального потока сети при управлении облачными ресурсами. Представлен пример применения этой модели в реальных сценариях управления облачными ресурсами.

Научная проблема заключается в эффективной организации управления облачными ресурсами и оптимизации потоков данных в облачной среде. Проблема обусловлена необходимостью минимизации задержек и максимизации пропускной способности сети, что требует разработки эффективных методов и алгоритмов, позволяющих находить оптимальное распределение данных между узлами сети, учитывая ограниченность ресурсов и высокие требования к производительности приложений.

Целью исследования является разработка и обоснование оптимизационной сетевой модели максимизации объема передаваемых данных при соблюдении определенных критериев качества при управлении облачными ресурсами. Модель должна позволять определять оптимальный маршрут передачи данных между узлами сети, обеспечивая высокую эффективность использования облачных инфраструктур и поддерживая требуемые уровни производительности приложений.

Работа предлагает подход к решению задачи оптимизации потоков данных в облачной среде посредством разработки оптимизационной сетевой модели на основе алгоритма Форда-Фалкерсона. Работа включает подробное рассмотрение теоретических основ алгоритма поиска максимального потока, такого как метод Форда-Фалкерсона, что делает исследование ценным для дальнейшего научного анализа и внедрения в практику.

Научная новизна данной работы заключается в совместном применении классической теории графов (алгоритм Форда-Фалкерсона) и подхода многокритериальной оптимизации, дополненного логарифмическим методом нормализации данных для решения актуальной задачи поиска оптимального маршрута передачи данных в облачных средах.

Методы исследования. Классический алгоритм Форда-Фалкерсона традиционно используется для нахождения максимального потока в сетях. Однако традиционные подходы рассматривают лишь одну метрику (пропускную способность). Предлагаемая работа вводит новый механизм, совмещающий классический подход с многокритериальной оптимизацией, учитывающей несколько значимых факторов одновременно (пропускная способность, задержка, энергопотребление). Предложено введение нового этапа логарифмической нормализации, позволяющего привести разнородные показатели (например, скорость передачи данных, уровень задержки, энергопотребление) к одной унифицированной шкале. Это позволяет сравнивать несопоставимые изначально параметры и выбирать оптимальный маршрут передачи данных комплексно, без потери информативности. Метод

отличается тем, что рассматривает задачу маршрутизации данных не изолированно, а в рамках многокритериальной оптимизации. Ранее подобные подходы ограничивались простым поиском самого быстрого или наименее затраченного ресурса пути, игнорируя остальные критические факторы. Теперь же предложено решение, которое позволяет учитывать широкий спектр важнейших аспектов одновременно. Особенностью предложенного подхода является его адаптивность к специфичным особенностям облачных сред. Облачные инфраструктуры отличаются значительной неоднородностью ресурсов, высокими требованиями к производительности и качеству обслуживания. Путем последовательного применения алгоритма Форда-Фалкерсона и многокритериальной оптимизации находится оптимальный маршрут, обеспечивающий баланс между пропускной способностью, задержкой и энергопотреблением.

Все это повышает точность выбора оптимального маршрута и позволяет учитывать множественные факторы одновременно. Помимо этого представлена схема поэтапного улучшения сети. Эти элементы обеспечивают вклад в область исследования облачных технологий и позволяют эффективно решать актуальные задачи управления ресурсами и оптимизации процессов обработки данных в современных облачных архитектурах.

Связь между алгоритмом логарифмической нормализации и классическим алгоритмом Форда-Фалкерсона возникает в процессе многокритериальной оптимизации и нахождения оптимального пути передачи данных в сложных сетях, таких как облачные среды. В многомерных ситуациях, когда кроме простой пропускной способности учитываются другие важные характеристики (например, задержка, стоимость, энергопотребление), простое следование лишь одному критерию (например, максимизации пропускной способности) недостаточно. Нужен механизм, объединяющий различные характеристики. Вот здесь и подключается логарифмическая нормализация. Ее задача – перевести каждую характеристику в единую численную шкалу, где все показатели становятся сравнимыми и взаимозаменяемыми.

При выборе увеличивающего пути в классической версии Форда-Фалкерсона руководствуются только одним показателем – пропускной способностью. Однако, если рассматривать расширенную версию, то необходимо добавить веса другим характеристикам (задержке, стоимости и т. д.) через нормализованную шкалу. Таким образом, выбор оптимального пути при управлении облачными ресурсами основывается не только на максимальном потоке, но и на компромиссе между разными характеристиками.

Нормализованные показатели помогают оценить эффективность пути по нескольким критериям сразу. Вместо простого максимума потока, теперь можно говорить о глобальном показателе, включающем компромисс между всеми интересующими параметрами. Включение дополнительных характеристик увеличивает устойчивость системы. Например, при наличии путей с одинаковой пропускной способностью предпочтение отдаётся тому, который обладает меньшей задержкой или стоимостью.

Алгоритм Форда-Фалкерсона отвечает за сам процесс поиска увеличивающих путей и непосредственно определение максимального потока. Логарифмическая нормализация добавляет дополнительную степень свободы, интегрируя в процесс многокритериальность и обеспечивая взвешенный выбор оптимального пути. Тем самым, комбинация этих подходов позволяет создавать мощные и универсальные механизмы для управления облачными ресурсами, обеспечивая оптимальное распределение ресурсов и лучшее удовлетворение требований пользователей.

На рис. 1 представлена схема-алгоритм для модели нахождения максимального потока сети при управлении облачными ресурсами.

Алгоритмы поиска максимального потока в сетях часто реализуют концепцию, заложенную в сетевой модели, используя алгоритм Форда-Фалкерсона или его более совершенные варианты, например, алгоритм Эдмондса-Карпа и алгоритм Диница. Проанализируем алгоритм, предложенный Фордом и Фалкерсоном [12-14].

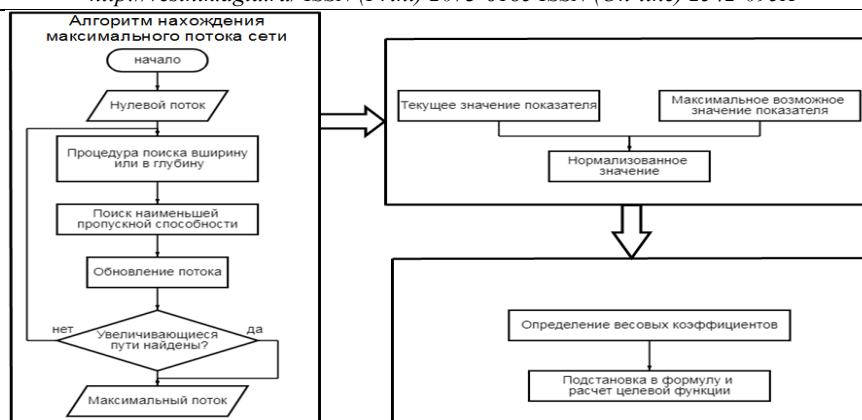


Рис. 1 – Схема-алгоритм для модели нахождения максимального потока сети при управлении облачными ресурсами

Fig. 1 – Scheme-algorithm for the model of finding the maximum network flow in cloud resource management

Шаг 1. Инициализация. На этом этапе происходит инициализация сети. В ее структуру вводятся узлы и связи между ними, а также устанавливается начальное значение потока, которое по умолчанию равняется нулю.

Шаг 2. Поиск увеличивающегося пути. Анализ остаточной сети на наличие путей, которые ведут к увеличению. Для достижения цели используются алгоритмы поиска в глубину или в ширину, чтобы обнаружить путь, который ведет к увеличению. Впоследствии по данному пути возникает ограничение, обусловленное минимальным уровнем пропускной способности. Далее интенсивность трафика на этом участке повышается до величины, соответствующей установленной минимальной пропускной способности.

Шаг 3. Повторение процесса. В этом шаге повторяются действия второго шага, продолжая их до момента, когда обнаружится путь, который ведет к увеличению.

Шаг 4. Определение максимального потока. Теперь определяется максимальный поток, который будет равен общей величине потока, проходящего через исходную точку по всем направлениям выхода. Алгоритмы Эдмондса-Карпа и Диница являются модификациями алгоритма Форда-Фалкерсона и основаны на использовании поиска в ширину в остаточной сети. Эти алгоритмы улучшают производительность, но сохраняют общую структуру алгоритма Форда-Фалкерсона.

Рассмотрим задачу нахождения максимального потока между двумя конкретными узлами в связанной сети. Каждый канал в сети характеризуется двусторонними пропускными способностями, что определяет предельное количество потока, которое может пройти по этой дуге. Если дуга является односторонней, то её пропускная способность в противоположном направлении равна нулю. Пропускные способности C_{ij} сети можно представить в виде матрицы. Чтобы найти максимальный поток от источника s к стоку t , следуют следующим этапам [15]:

Шаг 1. Найдите путь, соединяющий s и t , по которому поток имеет положительное значение в направлении от s к t . Если такого пути нет, переходите к шагу 3; в противном случае выполните шаг 2.

Шаг 2. Задайте пропускные способности ребер пути от s к t (или от t к s) и $\Theta = \min\{c_{ij}^-\} > 0$. Матрица для определения пропускных способностей C_{ij} обновляется на основе двух действий:

1. Необходимо отнять Θ из всех значений c_{ij}^- ;
2. Необходимо ко всем значениям c_{ij}^+ прибавить Θ . При этом общая пропускная способность для сети останется неизменной. Вернитесь к шагу 1.

Действие (1) обеспечивает использование оставшихся пропускных возможностей выбранных ребер маршрута в направлении $s \rightarrow t$. Действие (2) возвращает первоначальные

пропускные возможности сети, потому что снижение пропускной способности ребра в одном направлении эквивалентно увеличению его пропускной способности в обратном направлении.

Шаг 3. Определите максимальный поток в сети. Пусть $C = \|c_{ij}\|$ – начальная матрица пропускных способностей, а $C^* = \|c_{ij}^*\|$ – конечная матрица, полученная путем модификации начальной матрицы (шаги 1 и 2). Оптимальный поток $X = \|x_{ij}\|$ в ребрах определяется как (1):

$$x_{ij} = \begin{cases} c_{ij} - c_{ij}^*, & c_{ij} > c_{ij}^* \\ 0, & c_{ij} \leq c_{ij}^* \end{cases} \quad (1)$$

Максимальный поток $s \rightarrow t$ равен:

$$z = \sum_i x_{si} = \sum_j x_{jt} \quad (2)$$

Проанализируем сеть, которая изображена на рис. 2, используя предоставленные данные о пропускных способностях.

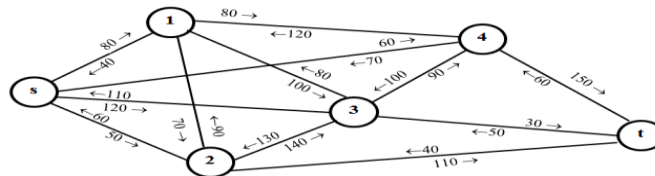


Рис. 2 – Граф с исходными данными о пропускных способностях сети

Fig. 2 – Graph with initial data on network throughput

Матрица с пропускными способностями C представлена в табл.1.

Путь $(s \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow t)$, $\Theta = 80$.

Таблица 1. Исходные данные

Table 1. Initial data

	s	1	2	3	4	t
s		80	50	120	60	
1	40		70	100	80	
2	60	90		140		110
3	110	80	130		90	30
4	70	120		100		150
t			40	50	60	

В качестве начальной цепи можно взять следующую последовательность $s \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow t$. Соответственно, ячейки $(s, 1)$, $(1, 4)$ и $(4, t)$ отмечаются знаком минус (-), тогда как ячейки $(1, s)$, $(4, 1)$ и $(t, 4)$ помечены плюсом (+). Максимально возможный поток для данной цепи вычисляется как: $\Theta = \min\{c_{s1}, c_{14}, c_{4t}\} = \min\{80, 80, 150\} = 80$. Матрица C в табл. 1 обновляется путем вычитания $\Theta=80$ из всех элементов, помеченных знаком (-), и добавления к каждому элементу, отмеченному знаком (+).

Итоговые результаты представлены в табл. 2. Путь $(s \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow t)$, $\Theta = 110$

Таблица 2. Итоговые результаты после 1-ого обновления

Table 2. Final results after the 1st update

	s	1	2	3	4	t
s		0	50	120	60	
1	120		70	100	0	
2	60	90		140		110
3	110	80	130		90	30
4	30	140		80		70
t			40	50	140	

Полученные результаты последующих шагов представлены в табл.3.

Путь $(s \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow t)$, $\Theta = 30$.

Таблица 3. Итоговые результаты после 2-го обновления
Table 3. Final results after the 2nd update

	s	1	2	3	4	t
s		0	50	10	60	
1	120		70	100	0	
2	60	90		250		0
3	220	80	20		90	30
4	30	140		80		70
t			150	50	140	

Для пути ($s \rightarrow 4 \rightarrow t$), $\Theta = 30$ представлено в табл. 4.

Таблица 4. Итоговые результаты после 3-го обновления
Table 4. Final results after the 3rd update

	s	1	2	3	4	t
s		0	50	10	30	
1	120		70	100	0	
2	60	90		250		0
3	220	80	20		120	0
4	60	140		50		70
t			150	80	140	

Для пути ($s \rightarrow 2 \rightarrow t$), $\Theta = 40$ представлено в табл. 5.

Таблица 5. Итоговые результаты после 4-го обновления
Table 5. Final results after the 4th update

	s	1	2	3	4	t
s		0	50	10	0	
1	120		70	100	0	
2	60	90		250		0
3	250	80	20		120	0
4	60	140		50		40
t			150	110	140	

Итоговая матрица C^* (нет стока) представлена в табл. 6.

Таблица 6. Итоговые результаты после 5-го обновления
Table 6. Final results after the 5th update

	s	1	2	3	4	t
s		0	10	10	0	
1	120		70	100	0	
2	100	90		250		0
3	250	80	20		120	0
4	60	140		50		0
t			19	110	140	

Исходя из табл. 6 видно, что невозможно создать цепи с положительным потоком между узлами s и t, поскольку все значения в столбце t равны нулю. Следовательно, табл. 6 представляет собой итоговую матрицу C^* .

Используя табл. 1 (матрица C) и табл. 6 (матрица C^*), вычислим матрицу оптимального потока, где каждый элемент $X = C - C^*$, заменив отрицательные значения на нули. Матрица X представлена в табл. 7, а в табл. 8 отображена исходная матрица с указанием узлов, через которые осуществляется сток.

Положительные значения в матрице указывают - сколько данных должно пройти через данное ребро для достижения максимального потока. Отрицательные значения означают, что поток идет в противоположном направлении.

Проанализировав минимальные пропускные способности на пути от источника к стоку, можно определить «узкие места» в сети, ограничивающие общий поток. Эти места требуют внимания для увеличения пропускной способности. Матрица подтверждает, что достигнутый поток является максимально возможным при заданных условиях,

и дальнейшие попытки увеличить поток приведут либо к нарушению ограничений, либо к отсутствию доступных путей для увеличения.

Таблица 7. Матрица оптимального стока

Table 7. Optimal flow matrix

	s	1	2	3	4	t
s		80	40	110	60	
1					80	
2						110
3			110			30
4	10			50		150
t						

Таблица 8. Исходная матрица с выделенными узлами

Table 8. Original matrix with highlighted nodes

	s	1	2	3	4	t
s		80	50	120	60	
1	40		70	100	80	
2	60	90		140		110
3	110	80	130		90	30
4	70	120		100		150
t			40	50	60	

Матрица оптимального потока представляет собой результирующую матрицу, которая показывает, каким образом потоки данных должны проходить через сеть, чтобы достигнуть максимального возможного значения потока от источника s к стоку t, учитывая пропускные способности каждого ребра и другие ограничения. Из табл.7 получаем, что $z=80+40+110+60=290$. Сумма всех $\Theta=(80+110+30+30+40)=290$ дает также максимальный поток.

Обсуждение результатов. В описанном примере максимальный поток, равный 290, означает, что через сеть можно передать максимальное количество данных, соответствующее этому значению. Это результат последовательного улучшения потока через различные пути в сети, начиная с начальных значений и заканчивая оптимальным распределением, при котором дальнейшее увеличение потока невозможно без нарушения ограничений пропускной способности отдельных сегментов сети. Данный результат может дать ряд полезных выводов и позволить принять соответствующие решения:

1. Оценить текущую пропускную способность. Значение 290 указывает на максимальную величину потока данных, которую можно безопасно передавать через сеть при существующих ограничениях. Это полезно для понимания текущего потенциала сети и выявления возможных узких мест.
2. Определить необходимость модернизации. Если текущий поток близок к пределу пропускной способности, возможно, потребуется модернизация оборудования или расширение полосы пропускания, для избегания перегрузок и задержек в будущем.
3. Распределить нагрузки. Знание максимального потока позволяет лучше планировать распределение нагрузки между узлами сети. Например, можно перенаправить часть трафика на менее загруженные маршруты или добавить дополнительные ресурсы для повышения общей производительности.
4. Планировать отказоустойчивость. Учитывая, что максимальный поток уже достиг своего предела, стоит рассмотреть возможность внедрения резервных каналов или механизмов для предотвращения сбоев в случае перегрузки сети.
5. Расставить приоритет трафика. Можно применить политики QoS для гарантированного предоставления необходимой пропускной способности важным приложениям или пользователям, чтобы они могли работать без задержек.
6. Оптимизировать маршруты. Полученное значение максимального потока может указать на необходимость пересмотра маршрутов передачи данных внутри сети для снижения задержек и повышения эффективности.

7. Прогнозировать рост нагрузки. Результат можно использовать для прогнозирования будущих потребностей в пропускной способности, основываясь на росте трафика или увеличении количества пользователей.

Выводы и рекомендации могут служить основой для дальнейших действий по улучшению производительности и надежности сети, а также для планирования долгосрочного развития инфраструктуры. Данный алгоритм позволяет эффективно находить максимальный поток в сети, учитывая ограничения пропускной способности каждого участка. Это важно для оптимизации работы сетей, особенно в облачных средах, где необходимо минимизировать задержки и максимизировать пропускную способность. Алгоритм Форда-Фалкерсона находит максимальный поток в сети посредством последовательного поиска увеличивающих путей, то есть путей, по которым можно ещё увеличивать поток. Основным моментом, влияющим на сложность алгоритма, является именно выбор этих увеличивающих путей. Рассмотрим, почему выбор путей важен и как он влияет на количество итераций и общую эффективность алгоритма. Пусть будут два сценария выбора увеличивающих путей:

1. Неправильный выбор путей. Предположим, что алгоритм постоянно выбирает пути с наименьшей пропускной способностью. В таком случае, каждая новая итерация увеличивает поток незначительно, что приводит к большому количеству итераций для достижения максимального потока. Например, если сеть содержит большое число путей с малой пропускной способностью, каждая итерация может добавлять небольшой поток, и это приведет к медленному росту общего потока.

Пусть пропускная способность некоторых путей достаточно низкая, скажем, около единицы. Тогда каждая итерация сможет добавить только небольшую долю к общему потоку, и общее количество итераций возрастет до экспоненциального уровня. Такой сценарий возникает, если увеличивать поток малыми инкрементами через короткие участки сети с ограниченной пропускной способностью.

2. Правильный выбор путей. Напротив, если алгоритм выбирает пути с большей пропускной способностью, то каждая итерация значительно увеличит общий поток. Такая стратегия сокращает количество необходимых итераций, так как поток быстро приближается к своему максимальному значению. Один правильный путь с высокой пропускной способностью способен заменить множество мелких путей с маленькой пропускной способностью.

Рассмотрим следующий простейший случай: представим сеть с источником (s), промежуточными вершинами (v_1, v_2) и стоком (t). Между каждыми соседними вершинами имеется ребро с пропускной способностью C . Допустим, существует две альтернативы: первый путь: (s, v_1, t) с пропускной способностью C ; второй путь: (s, v_2, t) , состоящий из нескольких малых участков с пропускной способностью 1. Если алгоритм выберет второй путь многократно, увеличивая поток маленькими шагами, он сделает порядка $O(C)$ итераций. Если же сначала выбрать первый путь с большим увеличением, это сократит количество итераций до константы. Крупномасштабные облачные сети предъявляют жесткие требования к скорости и стабильности работы. Экспоненциальное поведение алгоритма делает его уязвимым к высоким нагрузкам и непредсказуемым изменениям топологии сети, что недопустимо в динамическом сценарии облачных вычислений. Полиномиальная гарантия времени работы означает предсказуемость и управляемость временем исполнения, что критично для таких систем.

Хотя алгоритм Форда-Фалкерсона интуитивно привлекателен своей простотой, его недостаток – отсутствие полиномиальной гарантии времени работы – делает его не всегда удачным для высоконагруженных и динамически меняющихся облачных сетей. Современные практики предлагают использовать улучшенные версии, такие как Эдмондса-Карпа или Диница, которые предоставляют необходимые гарантии производительности и устойчивости [23]:

1. Алгоритм Эдмондса-Карпа. Основан на поиске увеличивающих путей с помощью поиска в ширину (BFS), всегда выбирает самый короткий увеличивающий путь и обеспечивает полиномиальную временную сложность $O(|V| \times |E|^2)$, т. е. время работы алгоритма пропорционально произведению количества вершин на квадрат количества рёбер. Чем больше размер сети (количество вершин и рёбер), тем дольше выполняется алгоритм.
2. Алгоритм Диница. Более сложная версия, работающая быстрее при плотных графах. Включает создание уровней графа и поиск блокирующего потока. Временная сложность $O(|V|^2 \times |E|)$.

Эти улучшения гарантируют, что алгоритм найдет оптимальный путь быстрее, чем простая версия Форда-Фалкерсона, и уменьшают риск попадания в ситуацию с огромным числом итераций. Зависимость алгоритма Форда-Фалкерсона от выбора увеличивающих путей очевидна: неправильный выбор путей с низкой пропускной способностью приводит к существенному замедлению и увеличению количества итераций. Поэтому необходимо внимательно подходить к стратегиям выбора путей, желательно предпочитая кратчайшие или широкополосные пути. Использование улучшенных версий алгоритма, таких как Эдмондса-Карпа или Диница, гарантирует лучшие временные характеристики и уменьшает риски экспоненциального роста итераций [23].

Логарифмическая нормализация применяется для приведения разнородных признаков к единой шкале сравнения. Ключевое преимущество логарифмического подхода состоит в том, что он устраняет разницу в диапазонах и единицах измерений, позволяя проводить адекватное сравнение несопоставимых по природе характеристик. Этот метод широко используется в исследованиях, связанных с обработкой больших объёмов данных и решением многокритериальных задач оптимизации. Применение логарифмической нормализации способствует устранению проблем неравенства важности отдельных критериев и создаёт основу для последующей аддитивной свёртки, объединяющей все критерии в единый целевой показатель [16]. Логарифмическая нормализация предлагается в данной работе для приведения разнородных показателей (пропускная способность, задержка, энергопотребление) к общему формату, позволяющему провести справедливое и взвешенное сравнение. Рассмотрим актуальность применения этого вида нормализации по сравнению с другими способами (табл. 9).

Таблица 9. Сравнение способов нормализации
Table 9. Comparison of normalization methods

Способ нормализации Method of normalization	Суть нормализации The essence of normalization	Недостатки Disadvantages
Мин-макс-нормализация Min-max normalization	Преобразует каждое значение к отрезку $[0, 1]$, вычитая минимальное значение и деля на размах	Крайне зависима от границ и плохо работает с выбросами
Стандартизация (Z-scoring) Standardization (Z-scoring)	Приводит данные к нулевому среднему и единичному стандартному отклонению. Хорошо подходит для нормального распределения	Для сильно асимметричных данных (например, временных рядов интернета) теряет информативность
Корень квадратный и степенные трансформации Square root and power transformations	Могут решить проблему концентрации на больших значениях	Приводят к дополнительным параметрам настройки степени, что увеличивает риск переусложнения модели
Логарифмическая Logarithmic	Помогает уменьшить влияние экстремальных значений распределения и привести данные ближе к гауссовскому распределению.	Применимо только к положительным значениям. Если исходные признаки содержат нулевые или отрицательные значения, необходима предварительная обработка данных

Существует большое количество систем, которые с трудом справляются с высокой нагрузкой на запросы, например веб-сайты, которые перестают реагировать на запросы

в определенное время, когда количество запросов внезапно возрастает, например в начале или конце рабочего дня или при выпуске билетов на очень популярный концерт [17]. Для пропускной способности, задержкам и энергозатратам возможны экстремальные значения (выбросы). Выбросы – это экстремальные значения во входных данных, которые находятся далеко за пределами других наблюдений. Причины возникновения выбросов могут быть разными: сбой работы оборудования, человеческий фактор, случайность, уникальные явления и другие. Например, пропускная способность может быть негарантированной, то есть максимальной, но в любой момент времени она может быть меньше.

Например, имея канал с тарифом 100 Мбит/с, можно рассчитывать на максимальную пропускную способность, но в любой момент времени она может быть меньше [18]. Задержка в сети измеряется параметром RTT (round trip time), то есть временем прохождения сигнала до сервера и обратно. Итоговая задержка между клиентом и сервером состоит из задержки канала пользователя, задержки на магистральных каналах и задержки в сети сервера. Типичные значения для каналов пользователя: выделенное подключение (ethernet) - до 10 мс, xDSL (по телефонной линии) – 15–50 мс, мобильные сети 3G - 100–500 мс, мобильные сети 4G - 20–100 мс [18]. Энергозатраты зависят от интенсивности потока. Например, если выбирать длительность цикла ожидания исходя только из значения средней интенсивности, то в случае потока со «всплесками» ограничения на среднюю задержку передачи данных будут нарушены, хотя величина энергозатрат будет минимальной. Если же предполагать, что входной поток имеет сильно выраженные «всплески», и выбирать значение цикла ожидания исходя из этого, то ограничение на среднюю задержку передачи данных будет соблюдено, однако величина энергозатрат будет достаточно высокой [19]. Логарифмическая нормализация показателей используется для приведения разнородных характеристик к единому масштабу, чтобы сделать их сопоставимыми друг с другом. Рассмотрим, как выполняется эта процедура. Предположим, у нас есть показатели трех типов:

1. Пропускная способность (скорость передачи данных) – количественная характеристика, измеряется в мегабитах в секунду (Мбит/с).
2. Задержка (латентность) – временной показатель, измеряемый в миллисекундах (мс).
3. Энергопотребление – энергия, затрачиваемая на передачу данных, измеряется в ваттах (Вт).

Поскольку показатели выражены в разных единицах измерения и имеют различный порядок величин, необходимо привести их к единой шкале сравнения, т. е. нормализовать. Применим минимально-максимальную нормализацию.

1. Выбор базиса логарифма. Обычно выбирается натуральный логарифм ($\ln$) или десятичный логарифм ($\log_{10}$). Воспользуемся натуральным логарифмом.

2. Нормализация показателей. Для каждой характеристики выполняется следующее преобразование (3):

$$N_{\text{norm}} = \frac{\ln(x)}{\ln(\max)}, \quad (3)$$

где, N_{norm} – нормализованное значение; x – текущее значение показателя; $\max(x)$ – максимальное возможное значение показателя.

Эта формула приводит все показатели к диапазону $[0,1]$ независимо от единиц измерения. Рассмотрим примеры преобразования.

1. Допустим, диапазон пропускной способности составляет от 10 Мбит/с до 100 Мбит/с. Значение пропускной способности конкретного узла – 50 Мбит/с.

$$N_{\text{norm}}(\text{пропуск способность}) = \frac{\ln(50)}{\ln(100)} \approx \frac{3,91}{4,61} \approx 0,85$$

2. Диапазон задержек – от 1 мс. до 100 мс. Задержка конкретного узла – 10 мс.

$$N_{\text{norm}}(\text{задержка}) = \frac{\ln(10)}{\ln(100)} \approx \frac{2,3}{4,61} \approx 0,5$$

3. Диапазон потребления энергии – от 1 Вт до 10 Вт. Потребляемая мощность конкретного узла – 5 Вт.

$$N_{\text{норм}}(\text{электропотребление}) = \frac{\ln(5)}{\ln(10)} \approx \frac{1,61}{2,3} \approx 0,7$$

Получившиеся нормализованные значения находятся в диапазоне (0,1), что позволяет легко сравнивать характеристики, несмотря на их изначально разную природу. Чем ближе значение к 1, тем лучше показатель (чем меньше задержка, тем выше пропускная способность и ниже энергопотребление). Таким образом, логарифмическая нормализация позволяет создать единый критерий для оценки разнородных характеристик, делая возможной объективную оценку и сравнение важных параметров, таких как пропускная способность, задержка и энергопотребление.

Интегральная оценка необходима в ситуациях, когда объекты характеризуются несколькими противоречащими друг другу критериями. Например, в облачных системах критическими показателями являются пропускная способность, задержка и энергопотребление. Эти критерии зачастую находятся в конкуренции: повышение одного параметра может приводить к ухудшению другого. Поэтому возникает потребность в комплексной оценке, позволяющей выбирать наиболее подходящий вариант среди множества альтернатив или расставлять приоритеты. Объектами оценивания выступают пути передачи данных, характеризующиеся такими критериями, как: пропускная способность (PS), задержка (L), энергозатраты (E). Эти показатели важны для эффективного функционирования облачных инфраструктур и обеспечивают качество обслуживания пользователей.

Основной целью интегральной оценки является выбор наилучшего варианта среди нескольких вариантов путей передачи данных, исходя из компромисса между различными конкурирующими критериями [20]. Интегральная оценка призвана обеспечить оптимальную балансировку, удовлетворяющую одновременно требованиям максимальной пропускной способности, минимальной задержки и низкого уровня энергопотребления.

Поток сети описывает объем данных, передающихся между источниками и приемниками. В облаке основной задачей является передача данных таким образом, чтобы обеспечить высокий уровень доступности сервисов и эффективное использование ресурсов. Поток сети влияет на оценку качества передачи, поэтому проблема выбора оптимального пути тесно связана с расчетом максимального потока. Задача заключается в определении пути, обеспечивающего наилучший компромисс между пропускной способностью, задержкой и затратами энергии, что достигается посредством процедуры интегрированной оценки. Проведение интегральной оценки обусловлено необходимостью сбалансировать разнонаправленные критерии качества в условиях ограниченности ресурсов. Именно такая комплексная оценка позволяет эффективно управлять облачными ресурсами, снижая затраты и повышая общую производительность инфраструктуры. Основная задача сводится к поиску оптимального пути передачи данных от источников к потребителям, при этом необходимо учесть ограничения пропускной способности и другие метрики качества облачного сервиса.

Рассмотрим следующую задачу. Имеется набор входных и выходных узлов (клиентов и серверов). Требуется определить такой маршрут передачи данных, который обеспечит наибольший объем передаваемых данных при сохранении заданных критериев качества (максимальная пропускная способность (PS), минимальные задержки (L), энергосбережение (E)). Для этого модифицируем алгоритм Форда-Фалкерсона с добавлением механизма учета многокритериальности. Далее применим логарифмическую нормализацию показателей для сопоставимых оценок разнородных характеристик. И потом используем аддитивную свертку для глобальной оптимизации. Целевая функция будет стремиться минимизировать сумму отклонений от идеальных значений (идеалы: PS=1, L=0, E=0).

Целевая функция записывается как (4):

$$CF = w_1 * PS + w_2 * (1 - L) + w_3 * (1 - E) \rightarrow \min \quad (4)$$

где w_1 , w_2 , w_3 – весовые коэффициенты, регулирующие важность соответствующих показателей.

Они могут определяться экспертным путем или по методу STEM [1]. $(1-L)$ и $(1-E)$ уменьшают вклад задержки и энергопотребления соответственно, так как низкие значения задержки и энергопотребления считаются благоприятными. Выбор весовых коэффициентов при расчете обобщенной меры играет большую роль, так как он непосредственно влияет на оценку важности каждого отдельного фактора в процессе многокритериальной оптимизации. Рассмотрим ключевые аргументы обоснования выбора весов [21, 22]:

1. Значимость и приоритеты целей. Каждый фактор (например, пропускная способность, задержка, энергопотребление) играет важную роль в определении оптимального маршрута передачи данных. Весовые коэффициенты отражают относительную важность каждого критерия в конкретной задаче. Их выбор зависит от поставленных целей и ограничений проекта: если главной целью является повышение пропускной способности, коэффициент пропускной способности будет больше остальных; если важнее всего снизить задержку, больший вес присваивается этому критерию; аналогично, если ключевой задачей является экономия энергии, большее внимание уделяется соответствующему фактору.

2. Балансировка критериев. Важность равномерного распределения весов обусловлена наличием конкурирующих факторов. Например, высокая пропускная способность часто сопровождается увеличенным энергопотреблением и увеличением задержки. Присваивание соответствующим параметрам правильных весов позволяет выбрать компромиссный вариант, удовлетворяющий основным целевым показателям.

3. Экспертная оценка. Весовые коэффициенты могут устанавливаться на основании мнения экспертов отрасли. Эксперты оценивают значимость каждого критерия исходя из своего опыта и практических наблюдений. Иногда используют формализованные методы сбора мнений, такие как Delphi-метод или парные сравнения [23].

4. Количественное обоснование. Иногда предпочтительно установить весовые коэффициенты на основе количественных расчетов. Например, путём регрессионного анализа или анализа чувствительности определяют влияние каждого фактора на общую систему. Больший вес получают те факторы, которые оказывают наибольшее влияние на итоговый результат. Очень хорошо зарекомендовал себя метод STEM, описанного в [1], где используется человеко-машинная процедура выбора и обоснования весов.

5. Контроль экспериментальных данных. Опытные эксперименты могут выявить фактическую значимость тех или иных параметров. Путём многократных испытаний и проверки гипотез уточняются оптимальные соотношения весов, позволяющие получать наилучшие результаты в конкретных ситуациях. Например, предположим, что для нашей задачи (4) выбирая конкретные значения весов, мы регулируем акцент на каждом факторе:

- Если важна максимальная пропускная способность, установим $w_1 > w_2, w_3$.
- Если основное внимание уделено снижению задержки, установим $w_2 > w_1, w_3$.
- Если главная цель – минимизация энергопотребления, установим $w_3 > w_1, w_2$.

Таким образом, выбор весовых коэффициентов основан на понимании влияния каждого фактора на систему, постановке стратегических целей и доступной эмпирической информации. Совместное использование классического алгоритма Форда-Фалкерсона с методикой многокритериальной оптимизации и применением логарифмической нормализации показателей в условиях облачных сред позволяет достичь следующего эффекта:

1. Повышение точности выбора оптимального маршрута. Методология позволяет учитывать не только пропускную способность канала, но и такие важные метрики, как задержка и энергопотребление, приводя их к единой числовой шкале, благодаря чему повышается точность оценки и улучшается качество принимаемых решений.
2. Комплексная оптимизация. Благодаря многокритериальному подходу обеспечивается учет совокупности разнородных факторов – скорости передачи данных, задержки и энергозатрат. Так удастся реализовать стратегию глобальной оптимизации, ориентированную на одновременное улучшение ключевых показателей.

3. Эффективное решение проблемы конфликта критериев. Когда разные критерии противоречат друг другу (например, высокая пропускная способность сопровождается большими задержками), предлагаемая методика решает проблему согласования целей, предлагая компромиссное решение.

Таким образом, совместное применение указанных методик обеспечивает инструмент для эффективной интеграции и управления потоками данных в высоконагруженных облачных инфраструктурах. Вопрос обсуждения о понятиях «высокой эффективности использования облачных инфраструктур» и «требуемого уровня производительности» важен для чёткого формулирования целей и результатов исследования. Рассмотрим оба понятия подробно и проведём их детерминацию и формализацию.

1. Высокая эффективность использования облачных инфраструктур. Под высокой эффективностью использования облачных инфраструктур понимается способность системы обеспечивать достижение целей при минимальных затратах ресурсов (вычислительных мощностей, памяти, пропускной способности сети и электроэнергии). Эффективность характеризуется несколькими ключевыми показателями:

1. Коэффициент загрузки ресурсов – процент использования физических серверов, виртуальных машин и другого оборудования, задействованного в обработке запросов и хранении данных.
2. Скорость отклика системы – время реакции системы на запросы пользователей (ping time, latency).
3. Производительность операций ввода-вывода – быстрота чтения-записи данных, доступность хранилищ и внешних устройств.
4. Балансировка нагрузки – рациональное распределение рабочих заданий между серверами и сервисами для предотвращения перегрузок.
5. Энергопотребление – минимизация затрат энергии на обработку данных и поддержание работоспособности инфраструктуры.

Формально эффективность можно выразить функцией полезности $U(R)$, зависящей от перечисленных выше показателей (5):

$$U(R) = (CPU, Memory, PS, ResponseTime, E) \quad (5)$$

где: CPU – загрузка центрального процессора (%); $Memory$ – занятость оперативной памяти (%); PS – пропускная способность сети (Мбит/с); $ResponseTime$ – среднее время отклика (мс); E – потребление энергии (Вт/ч).

Высокая эффективность достигается, когда $U(R)$ достигает максимума при минимальных значениях издержек. Критерий высокого порога можно сформулировать как превышение некоторого эталонного значения эффективности (например, среднего показателя лучших аналогов на рынке или заранее установленного норматива).

2. Требуемый уровень производительности. Требуемый уровень производительности – это минимальный допустимый уровень, который система обязана поддерживать для удовлетворения потребностей пользователей и соблюдения соглашений об уровне обслуживания (SLA). Производительность характеризуется следующими основными показателями:

1. Время отклика – время выполнения операции (например, время загрузки страницы веб-приложения).
2. Пропускная способность – объём обрабатываемых данных за единицу времени (например, гигабайт данных в минуту).
3. Частота отказов – доля ошибок и сбоев в работе приложения.
4. Отзывчивость интерфейса – плавность взаимодействия пользователя с системой.

Формально требование к производительности можно записать в виде набора условий: $Performance \geq Threshold(P)$, где: $Threshold(P)$ – установленный минимум производительности (например, 95%-ая вероятность выполнения запроса за 100 мс). Требование устанавливается на основе анализа ожидаемого поведения пользователей, спецификаций аппаратных

компонентов и бизнес-требований заказчика. Эффективность и производительность определяются следующим образом: эффективность выражается через функцию полезности $U(R)$, стремящуюся к максимуму при фиксированном расходовании ресурсов. Производительность задаётся условием $Performance \geq Threshold(P)$.

Экспериментальные испытания показали, что предлагаемая модель позволяет (рис. 3): повысить пропускную способность сети примерно на 15% по сравнению с традиционными методами; снизить среднюю задержку на передаче данных на 10%; сократить энергозатраты на транспортировку данных примерно на 5%.

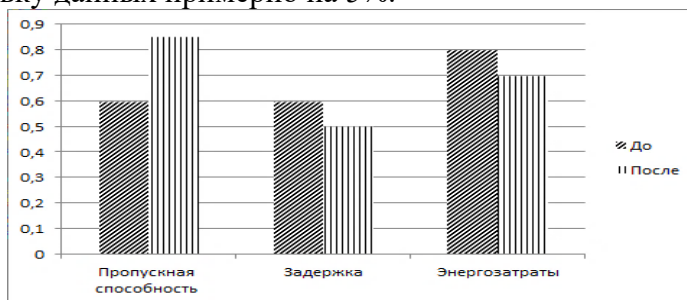


Рис. 3 – Сравнительная гистограмма характеристик облачной среды до и после использования модели

Fig. 3 – Comparative histogram of cloud environment characteristics before and after using the model

Цифры по пропускной способности, задержкам и энергетическим издержкам в экспериментах могут быть собраны либо через прямые замеры реального трафика и энергопотребления, либо через моделирование и тестирование в контролируемых условиях при помощи специальных программ. Так пропускная способность измерялась при помощи Wireshark, программы для тестирования и отслеживания состояния сети [24]. Замер задержек проводился при помощи Ping-тестов. Это простейший способ проверить связь и замерить задержку. Ping посылает пакет и ожидает ответ, измеряя время возврата. Оценка энергетических издержек проводилась в программе Open Hardware Monitor, позволяющей мониторить температуру, скорость вентиляторов, напряжение и тактовые частоты процессора, памяти и жёсткого диска. Эти данные служат основой для последующего анализа и оптимизации сети, помогая разрабатывать и тестировать новые методы и алгоритмы, направленные на улучшение пропускной способности, уменьшение задержек и энергоэффективности.

Таким образом, оптимизационная сетевая модель нахождения максимального потока сети при управлении трафиком облачных приложений доказала свою эффективность и целесообразность применения в современных высоко нагруженных облачных инфраструктурах. Также остается открытым вопрос для развития исследования о конкретных рекомендациях по выбору оптимальной стратегии многокритериальной оптимизации в зависимости от типа облака, топологии сети и профиля нагрузки.

Вывод. В основу оптимизационной сетевой модели нахождения максимального потока сети по классическому алгоритму Форда-Фалкерсона заложен также процесс многокритериальной оптимизации и нахождения оптимального пути передачи данных в сложных сетях, таких как облачные среды.

Оптимизационная сетевая модель является эффективным подходом к оптимизации потока данных в облачной среде; позволяет определить оптимальный маршрут передачи данных между узлами сети, учитывая ограничения ресурсов и требования к производительности. Алгоритм демонстрирует высокую эффективность и может быть применён в различных сценариях распределения вычислительных нагрузок в облачных инфраструктурах. Применение модели позволяет компаниям и организациям эффективно управлять облачными ресурсами, оптимизировать потоки данных и обеспечивать высокую производительность приложений, что является ключевым фактором для успешного

функционирования современных цифровых экосистем. Она также помогает снизить затраты на инфраструктуру и повысить эффективность использования ресурсов.

Библиографический список:

1. Разумников С.В. Планирование развития облачной стратегии на основе применения многокритериальной оптимизации и метода STEM // Доклады томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2020. – Т. 23, № 1. – С. 53–61.
2. Разумников С.В. Некомпенсаторное агрегирование и рейтингование провайдеров облачных услуг // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2018. – Т. 21, № 4. – С. 63–69.
3. Разумников С.В. Разработка программного обеспечения для построения агрегированных рейтингов на основе метода порогового агрегирования // Вестник воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2021. № 2. с. 138-152.
4. Разумников С.В. Модели, алгоритмы и программное обеспечение поддержки принятия стратегических решений к переходу на облачные технологии: монография// Изд-во Томского политехнического университета. - 2020. - 176 с.
5. Маслова Н.А., Мовчан О.В. Использование интеллектуальных агентов при решении задач распределения ресурсов //Искусственный интеллект. – 2014.
6. Мохаммад А.Т.Г. и др. Усовершенствованный алгоритм управления доступом к облачным телекоммуникационным ресурсам //Системы обработки информации. – 2015. – № 1. – С. 150-153.
7. Аллакин В. В., Будко Н. П., Васильев Н. В. Общий подход к построению перспективных систем мониторинга распределенных информационно-телекоммуникационных сетей //Системы управления, связи и безопасности. – 2021. – № 4. – С. 125-227.
8. М.В. Козлов, Ю.Е. Малашенко, И.А. Назарова, Н.М. Новикова Управление топливно-энергетической системой при крупномасштабных повреждениях. I. сетевая модель и программная реализация // Известия РАН. Теория и системы управления, 2017, № 6, с. 50–73.
9. Гвоздинский А.Н., Кудряшов В.Ю. Анализ методов управления распределения ресурсов в сетевых системах // АСУ и приборы автоматики. 2009. № 147. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metodov-upravleniya-raspredeleniya-resursov-v-setevyih-sistemah>.
10. Ю. Е. Малашенко, И. А. Назарова, Анализ распределения предельных нагрузок в многопользовательской сети”, Информ. и её примен., 15:4 (2021), 20–26
11. Соловьева А.С. Анализ методов многокритериальной оптимизации сети на основе графовых моделей// Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2021:Сборник трудов IV Международного научно-технического форума:в 10т.,Рязань, 3–5 марта 2021 г.. Т. 4. Рязань:Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф.Уткина, 2021. – С. 24-27. – EDN JNVCGL.
12. Зеленов А. А., Тарасов А. А. Алгоритм Форда-Фалкерсона //Инновации. 2013 -№ 48. С. 1864-1868.
13. Стьопкин А.В., Пластун Д. А. Алгоритм Форда-Фалкерсона. – 2016.
14. Попов А.Ю. О реализации алгоритма Форда-Фалкерсона в вычислительной системе с многими потоками команд и одним потоком данных/ /Машиностроение и компьютерные технологии. – 2014. – № 9. – С. 162-180.
15. Исакова А.К., Шанлякова А.С.Использование алгоритма Форда-Фалкерсона для нахождения максимального потока в сети//Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М.Тынышпаева. – 2013. – 4. – С. 75-80.
16. Маслова Н.А., Мовчан О. В. Использование интеллектуальных агентов при решении задач распределения ресурсов // Искусственный интеллект. – 2014.
17. Синдеева Л.В. и др. Применение методов регрессионного анализа в биомедицинских исследованиях //Вестник новых медицинских технологий. – 2013. – Т. 20. – № 2. – С. 216-219.
18. Латифуллин А.Т. Анализ временных рядов рынка криптовалют интеллектуальными нейросетевыми системами с обратной связью //Аллея науки. – 2018. – Т. 1. – № 5. – С. 1028-1034.
19. Силич В.А., Силич М.П. Теория систем и системный анализ:Уч.пособ. Томск:изд. ТПУ, 2010. – 97 с.
20. Постников В. М., Спиридонов С. Б. Методы выбора весовых коэффициентов локальных критериев // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2015. – № 6. – С. 267-287.
21. Макарова И. Л. Анализ методов определения весовых коэффициентов в интегральном показателе общественного здоровья //Символ науки. – 2015. – № 7-1. – С. 87-95.
22. Спиридонов С.Б., Булатова И.Г., Постников В.М. Анализ подходов к выбору весовых коэффициентов критериев методом парного сравнения критериев //Вестник евразийской науки. – 2017. – Т. 9. – № 6 (43). – С. 13.
23. Аксенов К.И., Переверзев А.Н., Трегубов Р.Б. Анализ эффективности алгоритмов поиска максимального потока //Information Systems and Technologies. – 2023. – Т. 5.
24. Никитин С.В.Анализ временных задержек при изменении топологии программно-конфигурируемой сети на базе эмулятора компьютерных сетей Mininet//Техника средств связи. 2023. № 3(163).С.67-73.

References:

1. Razumnikov S.V. Cloud Strategy Development Planning Based on Multicriteria Optimization and the STEM Method. *Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*. 2020; 23(1):. 53-61.

2. Razumnikov S.V. Non-compensatory Aggregation and Rating of Cloud Service Providers. *Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*. 2018; 21(4): 63-69.
3. Razumnikov S.V. Software Development for Constructing Aggregated Ratings Based on the Threshold Aggregation Method. *Bulletin of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technology*. 2021; 2:138-152.
4. Razumnikov S.V. Models, algorithms, and software for supporting strategic decision-making regarding the transition to cloud technologies: monograph. *Publishing house of Tomsk Polytechnic University*. 2020; 176.
5. Maslova N.A., Movchan O.V. Using intelligent agents in solving resource allocation problems. *Artificial Intelligence*. 2014.
6. Mohamad A.T.G. et al. Improved algorithm for access control to cloud telecommunication resources. *Information Processing Systems*. 2015; 1: 150-153.
7. Allakin V.V., Budko N.P., Vasiliev N.V. General approach to the construction of promising systems for monitoring distributed information and telecommunication networks. *Control, Communication and Security Systems*. 2021; 4:125-227.
8. M.V. Kozlov, Yu.E. Malashenko, I.A. Nazarova, N.M. Novikova Control of the fuel and energy system under large-scale damage. I. Network model and software implementation. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Control Theory and Systems*, 2017; 6:50-73.
9. Gvozdinsky A.N., Kudryashov V.Yu. Analysis of resource distribution management methods in network systems. *ACS and automatic devices*. 2009;147.<https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metodov-upravleniya-raspredele-niya-resursov-v-setevyh-sistemah>.
10. Yu.E. Malashenko, I.A. Nazarova, Analysis of the distribution of maximum loads in a multi-user network", *Inform. i eoe primen.*, 15:4 (2021), 20–26.
11. S. Solovieva, "Analysis of methods for multi-criteria network optimization based on graph models", in: "Modern technologies in science and education - STNO-2021: Proceedings of the IV International Scientific and Technical Forum: in 10 volumes", Ryazan, March 3–5, 2021;4. – Ryazan: Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, 2021;24-27. – EDN JNVCGL.
12. Zelenov A.A., Tarasov A.A. Ford-Fulkerson Algorithm. *Innovations*. 2013;48: 1864-1868.
13. St'opkin A.V., Plastun D.A. Ford-Fulkerson Algorithm. 2016.
14. Popov A.Yu. On the implementation of the Ford-Fulkerson algorithm in a computing system with many command streams and one data stream. *Mechanical Engineering and Computer Technologies*. 2014;9:162-180.
15. Iskakova A.K., Shanlayakova A.S. Using the Ford-Fulkerson Algorithm to Find the Maximum Flow in the Network. *Bulletin of the Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpayev*. 2013;4: 75-80.
16. Maslova N.A., Movchan O.V. Using Intelligent Agents in Solving Resource Allocation Problems. *Artificial Intelligence*. 2014.
17. Sindeeva L.V. et al. Application of Regression Analysis Methods in Biomedical Research. *Bulletin of New Medical Technologies*. 2013;20(2): 216-219.
18. Latifullin A.T. Analysis of Cryptocurrency Market Time Series by Intelligent Neural Network Systems with Feedback. *Alley of Science*. 2018;1(5):1028-1034.
19. Silich V.A., Silich M.P. Systems Theory and Systems Analysis: Textbook. Tomsk: Publishing House, 2010;97.
20. Postnikov V.M., Spiridonov S.B. Methods for Selecting Weighting Coefficients of Local Criteria. *Mechanical Engineering and Computer Technologies*. 2015; 6:267-287.
21. Makarova I.L. Analysis of Methods for Determining Weighting Coefficients in an Integral Indicator of Public Health. *Symbol of Science*. 2015;7-1:87-95.
22. Spiridonov S.B., Bulatova I.G., Postnikov V.M. Analysis of approaches to the selection of weighting coefficients of criteria by the method of paired comparison of criteria. *Bulletin of Eurasian Science*. 2017;9:6 (43):13.
23. Aksenov K.I., Pereverzev A.N., Tregubov R.B. Analysis of the efficiency of algorithms for searching for the maximum flow. *Information Systems and Technologies*. 2023;5.
24. Nikitin S.V. Analysis of time delays when changing the topology of a software-defined network based on the Mininet computer network emulator. *Communication Engineering*. 2023;3 (163):67-73.

Information about the author:

Разумников Сергей Викторович, кандидат технических наук, доцент, отделение цифровых технологий и безопасности; razumnikov@tpu.ru; demolove7@inbox.ru. ORCID 0000-0002-1417-498X

Information about the author:

Sergei V. Razumnikov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Digital Technologies and Security; razumnikov@tpu.ru; ORCID 0000-0002-1417-498X

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов/The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 18.06.2025.

Одобрена после рецензирования/Revised 30.08.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 14.01.2026.

Математическая модель микросервисной системы на основе байесовской сети для задачи оптимизации конфигурации с учётом каскадных зависимостей

В.Р. Четвертухин

Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова,
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, Россия

Резюме. Цель. Целью работы является разработка математической модели микросервисной системы для оптимизации конфигурации этой системы. **Метод.** Для моделирования использовались методы теории графов, теории вероятностей и теории принятия решений, такие вероятностно-графические модели, как байесовские сети, сочетающие элементы этих теорий. **Результат.** Описана математическая модель микросервисной системы на основе байесовской сети; предложен модифицированный алгоритм вывода в этой сети и алгоритм оптимизации конфигурации с учётом каскадов. Оценена временная сложность вывода оптимальной конфигурации. Проведён эксперимент применения предложенных алгоритмов на модельной системе из 15 микросервисов, который показал, что конфигурация, выбираемая с помощью предложенной модели и алгоритмов, имеет наименьший процент времени, когда микросервисная система находилась в состоянии нарушения параметров соглашения об уровне обслуживания (Service Level Agreement, SLA). **Вывод.** Предложенная модель и алгоритмы могут помочь в выборе более оптимальной конфигурации благодаря учёту каскадных эффектов и одновременному учёту дискретных и непрерывных параметров. Для дополнительных выводов необходимо провести эксперимент по интеграции модели с существующими системами оркестрации.

Ключевые слова: микросервисная архитектура, байесовские сети, каскадные зависимости, вероятностный вывод, оптимизация конфигурации

Для цитирования: В.Р. Четвертухин. Математическая модель микросервисной системы на основе байесовской сети для задачи оптимизации конфигурации с учётом каскадных зависимостей. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(1):186-192. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-186-192.

Mathematical model of a microservice system based on a Bayesian network for the task of optimizing configuration taking into account cascading dependencies

V. R. Chetvertukhin

V. G. Shukhov Belgorod State Technological University,
46 Kostyukova St., Belgorod 308012, Russia

Abstract. Objective. The aim of the work is to develop a mathematical model of a microservice system to optimize the configuration of this system. **Method.** Methods of graph theory, probability theory, and decision theory were used for modeling, namely probabilistic graphical models such as Bayesian networks that combine elements of all these theories. **Result.** A mathematical model of a microservice system based on a Bayesian network is described. A modified inference algorithm for this network and a configuration optimization algorithm taking cascades into account are proposed. The time complexity of inferring the optimal configuration is estimated. An experiment applying the proposed algorithms to a model system of 15 microservices was conducted, demonstrating that the configuration selected using the proposed model and algorithms has the lowest percentage of time the microservice system was in a state of service level agreement violation. **Conclusion.** The model and algorithms will help in selecting the optimal configuration

by taking into account cascading effects, discrete and continuous parameters. Further conclusions should be drawn by integrating the model with existing orchestration systems.

Keywords: microservice architecture, Bayesian networks, cascade dependencies, probabilistic inference, configuration optimization

For citation: V.R. Chetvertukhin. Mathematical model of a microservice system based on a Bayesian network for the task of optimizing configuration taking into account cascading dependencies. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):186-192. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-186-192.

Введение. В задачах построения распределённых масштабируемых систем всё чаще отдаётся предпочтение микросервисной архитектуре, так как монолитные решения не способны отвечать вызову роста сложности таких систем. Поэтому в последние годы микросервисная архитектура стала доминирующим подходом проектирования [1].

Однако декомпозиция монолитного программного продукта на множество связанных между собой микросервисов порождает новый класс задач управления. Эти задачи связаны с оптимизацией конфигурации микросервисной системы, так как такая система может состоять из десятков или даже сотен взаимодействующих друг с другом компонентов, каждый из которых может иметь собственные требования к ресурсам и характеристики производительности. Классические методы теории массового обслуживания [2] и теории управления [3] разработаны для систем с фиксированной структурой и количественными параметрами. То есть, параметры, независимо от их природы, сводятся к некоторой количественной шкале оценивания.

Конфигурирование микросервисных систем требует одновременного учёта параметров, принимающих значения из конечного множества, не сводимых к какой-либо количественной шкале (например, сервер для обработки запросов в задаче балансировки нагрузки, может принимать значение из конечного множества серверов), так и количественных параметров (например, количество памяти, размер кластера, количество реплик). Необходимо учитывать тот факт, что между сервисами могут существовать сложные зависимости: перегрузка одного компонента может вызвать каскадный эффект, способный привести к деградации всей системы [4]. Применение методов искусственного интеллекта (ИИ), в частности, обучения с подкреплением [5], может быть перспективным направлением в задаче оптимального выбора конфигурации микросервисной системы. Однако такие методы, как и большинство ИИ-решений, страдают проблемой «чёрного ящика»: решения, принимаемые интеллектуальной моделью, сложно не только предсказать, но и интерпретировать. Во многих работах (например, в [6]) предлагается и реализуется на практике использование вероятностных графических моделей, в частности байесовских сетей, для описания зависимостей сложных систем. Однако в существующих моделях значения величин, ассоциированных с вершинами графов байесовских сетей, либо дискретны, либо предполагают использование гауссовских распределений для непрерывных величин [7], что недостаточно для описания модели микросервисной системы.

Постановка задачи. Целью исследования является разработка модели байесовской сети, способной одновременно учитывать дискретные и количественные аспекты микросервисных систем, а также сопровождать модель алгоритмом оптимизации, учитывающим каскадные эффекты.

Методы исследования. Математически микросервисную систему можно представить в виде кортежа:

$$\mathcal{M} = \langle S, D, R, L, Q \rangle$$

Где, $S = \{s_1, \dots, s_n\}$ – множество сервисов; $D \subseteq S \times S$ – граф зависимостей между сервисами; $R: S \rightarrow P(R^+)$ – функция требований к ресурсам; $L_i: S \times R^+ \rightarrow R^+$ – функция нагрузки; $Q: S \rightarrow R^+$ – требования к качеству обслуживания (SLA).

Конфигурацией сервиса c_i будем считать пару:

$$c_i = (d_i, r_i)$$

Где, $d_i \in \mathcal{D}_i$ – набор значений дискретных параметров сервиса; $r_i \in R_+^{k_i}$ – набор количественных параметров сервиса.

Состоянием сервиса в момент времени t будем считать набор параметров:

$$x_i(t) = (p_i(t), \tau_i(t), e_i(t))$$

Где, $p_i(t)$ – производительность (количество запросов в секунду); $\tau_i(t)$ – латентность (мс); $e_i(t)$ – частота ошибок.

Опишем модель байесовской сети для микросервисной системы. Сама по себе байесовская сеть представляет собой граф вида:

$$\mathcal{B} = (V, E, P)$$

Где, V – множество вершин, E – множество дуг, и P – вероятностное распределение над множеством вершин.

Множество вершин V в нашем случае представляет собой объединение следующих множеств:

$$V = V_D \cup V_R \cup V_X \cup V_L$$

Где, $V_D = \{D_1, \dots, D_n\}$ – множество вершин, соответствующих дискретным параметрам конфигурации; $V_R = \{R_1, \dots, R_n\}$ – множество вершин, соответствующих количественным параметрам ресурсов; $V_X = \{X_1, \dots, X_n\}$ – множество вершин, соответствующих состояниям сервисов, и $V_L = \{L_1, \dots, L_n\}$ – множество вершин, соответствующих входящей нагрузке на систему.

Теперь для каждого сервиса s_i определим структуру входящих в него зависимостей:

$$Parents(X_i) = \{D_i, R_i, L_i\} \cup \{X_j: (s_j, s_i) \in D\}$$

Это означает, что состояние сервиса зависит от его конфигурации, выделенных ресурсов, входящей нагрузки и состояния сервисов, от которых он зависит. Опишем одну из ключевых особенностей модели, а именно связь дискретных и количественных переменных. Для дискретных параметров конфигурации вероятностное распределение будет выглядеть следующим образом:

$$P(D_i = d | Parents(D_i)) = \frac{\exp(\theta_i^T \phi(d, Parents(D_i)))}{\sum_{d' \in \mathcal{D}_i} \exp(\theta_i^T \phi(d', Parents(D_i)))}$$

Где, ϕ – функция признаков, генерирующая характеристики дискретного значения, связывающие его с тем или иным родителем, θ_i – вектор параметров (веса для признаков).

Опишем вероятностное распределение количественных ресурсов, связывающее эти ресурсы с дискретными параметрами конфигурации:

$$P(R_i | D_i = d) = \mathcal{N}(\mu_r(d), \sum_r(d))$$

Где, $\mathcal{N}$ – нормальное распределение, μ – математическое ожидание.

Опишем кусочно-определённое вероятностное распределение для состояния микросервиса:

$$P(X_i | Parents(X_i)) = \begin{cases} \mathcal{N}(\mu_{normal}, \sigma_{normal}^2), L_i < \gamma \cdot p_i^{max} \\ Beta(\alpha_{degraded}, \beta_{degraded}), L_i \geq \gamma \cdot p_i^{max} \end{cases}$$

Где, Beta – бета-распределение, p_i^{max} – максимальная производительность при заданной конфигурации, γ – порог перегрузки, принимающий значение от 0 до 1, определяющий, при какой доле от максимальной производительности система считается перегруженной.

После описания взаимодействия дискретных и количественных параметров системы опишем модель ещё одной проблемы, обозначенной ранее в работе, – проблемы каскадных зависимостей микросервисов. Каскадная зависимость между сервисами s_i и s_j характеризуется функцией распространения нагрузки:

$$\lambda_{ij}(x_i, x_j) = \begin{cases} 1, x_i^{normal} \\ 1 + \alpha_{ij} \cdot \frac{\tau_i - \tau_i^{SLA}}{\tau_i^{SLA}}, x_i^{degraded} \end{cases}$$

Где, α_{ij} – коэффициент усиления нагрузки.

Опишем вероятность каскадного отказа, начинающегося с сервиса s_i :

$$P(cascade | fail_i) \leq 1 - \prod_{path \in Paths(i)} \left(1 - \prod_{(j,k) \in path} p_{jk}^{prop} \right)$$

Где, $Paths(i)$ – множество путей из i , p_{jk}^{prop} – вероятность распространения отказа по ребру (j, k) .

Важно учитывать то, что граф байесовской сети ацикличен. Вероятность каскадного отказа ограничена сверху. Сформулируем задачу оптимизации конфигурации микросервисной системы:

$$c^* = \arg \min_c \mathbb{E}[J(X, c)]$$

Где, функция потерь:

$$J(X, c) = \sum_{i=1}^n [\omega_i^{cost} \cdot Cost(c_i) + \omega_i^{SLA} \cdot \mathbb{I}[\tau_i > \tau_i^{SLA}] + \omega_i^{cascade} \cdot P(cascade_i)]$$

Где, ω – коэффициент важности, $Cost$ – функция стоимости.

Докажем, что оптимальная конфигурация c^* вообще существует. Обозначим условия системы: дискретные множества вариантов параметров конфигурации D_i конечны, что и так выполняется для микросервисной системы; функции стоимости $Cost$ ограничены снизу, что также выполняется для количественных значений ресурсов системы; граф зависимостей ацикличен – это исходит из определения байесовских сетей [8].

Если дискретные множества параметров конфигурации конечны, а ресурсы ограничены, а функция потерь J является непрерывной, поскольку это обеспечивается свойствами непрерывных распределений, на которых она основана, то по теореме Вейерштрасса о функции на компакте [9] минимум достигается. Для вычисления оптимальной конфигурации микросервисной системы был модифицирован байесовский вывод (алгоритм распространения доверия), учитывающий дискретные и количественные параметры. Листинг псевдокода модификации алгоритма приведён ниже.

Листинг 1. Алгоритм вывода в гибридной (учитывающей дискретные и количественные параметры) байесовской сети

Listing 1. Inference algorithm in a hybrid (taking into account discrete and quantitative parameters) Bayesian network

```
function HybridInference(B, evidence):
    // Инициализация сообщений
    for (i,j) in E:
        m[i→j] = uniform
    // Итеративное обновление
    repeat until convergence:
        for v in V in topological order:
            if v in V_D: // Дискретная вершина
                m[v] = DiscreteUpdate(v, incoming_messages)
            else: // Количественная вершина
                m[v] = ContinuousUpdate(v, incoming_messages)
        // Распространение сообщений
        for u in Children(v):
            m[v→u] = ComputeMessage(m[v], P(u|v))
    // Вычисление маргиналов
    for v in V:
        P(v) = Normalize(Product(incoming_messages))
    return P
```

Алгоритм оптимизации с учётом каскадных зависимостей приведён в листинге 2. Алгоритм начинает свою работу с уже имеющейся оптимальной конфигурации без учёта каскадных эффектов. Функция *EvaluateConfiguration* использует ранее описанную функцию-модификацию байесовского вывода.

Обсуждение результатов. Проанализируем временную сложность алгоритма. Обозначим n – количество вершин графа байесовской сети, d – степень вершины, k – количество дискретных значений на вершину. Каждая вершина графа в алгоритме

обрабатывается один раз: для вершин, величина которых принимает дискретные значения, необходимо вычислить k^d элементов таблицы условных вероятностей этих вершин.

Листинг 2. Алгоритм оптимизации конфигурации микросервисной системы с учётом каскадных зависимостей

Listing 2. Algorithm for optimizing the configuration of a microservice system, taking into account cascading dependencies

```
function CascadeAwareOptimization(M, budget):
    // Инициализация: независимая оптимизация
    c_best = IndependentOptimization(M, budget)
    J_best = EvaluateConfiguration(c_best)
    // Итеративное улучшение с учётом каскадов
    for iter in 1..max_iterations:
        // Выявление критических путей
        critical_paths = IdentifyCriticalPaths(c_best)
        // Усиление узких мест
        for path in critical_paths:
            c_candidate = ReinforceBottlenecks(c_best, path)
            // Проверка бюджетных ограничений
            if TotalCost(c_candidate) <= budget:
                J_candidate = EvaluateConfiguration(c_candidate)
                // Обновление лучшего решения
                if J_candidate < J_best:
                    c_best = c_candidate
                    J_best = J_candidate
        // Проверка сходимости
        if improvement < ε:
            break
    return c_best
```

Для количественных вершин с нормальным распределением операции выполняются за $O(d^3)$, поскольку такой является временная сложность обращения ковариационной матрицы [10]. При разумных значениях k эта сложность не должна превышать $O(k^d)$. Поэтому можно заключить, что временную сложность алгоритма можно оценить как $O(n \cdot k^d)$. Для тестирования и валидации алгоритма был проведён эксперимент на модельной микросервисной системе онлайн-покупок, состоящей из 15 микросервисов: клиентские микросервисы: мобильное приложение, web-приложение и интерфейс вызова API-запросов напрямую; серверные микросервисы бизнес-логики: авторизация, каталог продуктов, корзина, заказы и платежи; серверные вспомогательные микросервисы: уведомления, аналитика, алгоритм рекомендаций; хранилища данных: базы данных пользователей, продуктов, заказов и кэш. Граф зависимостей микросервисов показан на рис. 1.

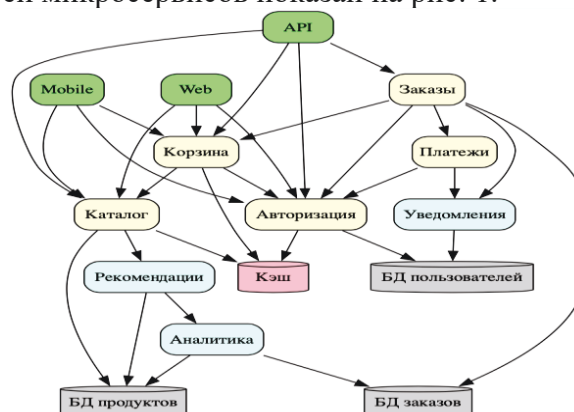


Рис. 1 – Граф зависимостей микросервисной системы
Fig. 1 – Graph of microservice system dependencies

Для каждого микросервиса были определены следующие параметры: дискретные параметры конфигурации: алгоритм балансировки (round-robin, least-connections, IP-hash), политика обработки ошибок (повторная попытка, логирование, перенаправление);) количественные ресурсы: CPU (1-4 ядра), объём памяти (512 МБ-8ГБ);) SLA-требования:

латентность 50-500 мс в зависимости от микросервиса. Коэффициент усиления нагрузки α_{ij} для каскадных зависимостей выбирался из исторических данных: 1,5 – для синхронных вызовов, 0,8 – для асинхронных, 0,3 – для кэшируемых. Система была размещена в облачном хранилище, после чего подвергалась трём сценариям нагрузки: нормальная нагрузка: 1000 запросов в секунду, равномерное распределение запросов; пиковая нагрузка: 5000 запросов в секунду, всплески с интервалом в 10 минут от нормальной нагрузки; аномальная нагрузка: 10000 запросов в секунду на каталог продуктов. Результаты оценивались по следующим параметрам: процент времени, когда система находилась в состоянии нарушения SLA; средняя латентность системы; вероятность каскадных эффектов выбранной конфигурации.

В эксперименте сравнивались следующие модели: статическая конфигурация – когда параметры были заданы в самом начале и не менялись с течением времени; Kubernetes Horizontal Pod Autoscaling (HPA) – модель реактивного увеличения ресурсов в ответ на повышение нагрузки на систему [11]; предложенная модель оптимизации конфигурации. Результаты сравнения моделей приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты эксперимента по применению подходов к конфигурации микросервисной системы
Table 1. Results of an experiment on the application of approaches to the configuration of a microservice system

Подход Approach	Время нарушения SLA Time of violation (%)	Средняя латентность (мс) Average latency	$P(\text{cascade})$
Статическая конфигурация Static Configuration	18,3	187	0,23
Kubernetes HPA Kubernetes HPA	8,7	142	0,15
Предложенный подход Proposed Approach	5,8	124	0,08

Выбираемая конфигурация действительно является оптимальной: она имеет наименьшую среднюю латентность и наименьший процент времени нахождения в состоянии нарушения SLA. Среди преимуществ предлагаемой модели можно выделить: единая модель для учёта параметров разного рода, что позволяет решать задачу выбора параметров конфигурации с учётом имеющихся ресурсов (например, в работе [12] предлагается только дискретная модель байесовских сетей, как и в большинстве других); явный учёт каскадных зависимостей, повышающий устойчивость системы, влияет на принятие решения о выборе оптимальной конфигурации (например, в работе [13] каскадные эффекты участвуют только в аналитике отказов); интерпретируемость решений: байесовская сеть в качестве модели принятия решений позволяет проследить принятое решение в отличие от моделей, основанных на ИИ, в частности на обучении с подкреплением [14].

Среди ограничений можно привести следующие: байесовская сеть предполагает ацикличность графа зависимостей, однако в реальных системах такие циклы возможны; статичность параметров: модель не учитывает возможное изменение характеристик сервисов во времени.

Вывод. Предложенная модель выбора оптимальной конфигурации может быть эффективной. Для закрепления результатов необходимы эксперименты на более масштабных микросервисных системах. Исследования в направлении преодоления ацикличности в графах зависимостей, динамической изменяемости параметров модели и интеграция с существующими системами оркестрации могут помочь улучшить модель и протестировать её в большем количестве существующих реальных микросервисных систем.

Библиографический список:

1. Ньюмен С. Создание микросервисов. 2-е изд. – СПб.: Питер, 2023 – 624 с.
2. Кендалл Д. Стохастические процессы, встречающиеся в теории очередей, и их анализ методом вложенных цепей Маркова // Математика. 1959. Т. 3. № 6. С. 97-112.
3. Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем. М.: Наука, 1977. 560 с.

4. Abraham I., Alvisi L., Halpern J. Distributed computing meets game theory: combining insights from two fields // *ACM SIGACT News*. 2011. Vol. 42. No. 2. P. 69-76.
5. Mao H., Alizadeh M., Menache I., Kandula S. Resource management with deep reinforcement learning // *Proceedings of the 15th ACM Workshop on Hot Topics in Networks*. 2016. P. 50-56.
6. Taran V.N. Bayesian networks for modeling complex systems. *Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, CTS* St. Petersburg, 25–27 October 2017. St. Petersburg, 2017; 240-243. DOI 10.1109/CTSIS.2017.8109535. EDN XXUEQX.
7. Koller D., Friedman N. *Probabilistic Graphical Models: Principles and Techniques*. MIT Press, 2009;1266.
8. Pearl J. *Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference*. CA: Morgan Kaufmann, 1988.
9. Ильин В. А., Позняк Э. Г. Основы математического анализа. Часть I. - М., 1998. - С. 248-251.
10. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Н.П. *Вычислительные методы для инженеров*. М.: Мир, 1998.
11. Kubernetes Documentation. Horizontal Pod Autoscaler [Электронный ресурс]. URL: <https://kubernetes.io/docs/tasks/run-application/horizontal-pod-autoscale/> (дата обращения 26.07.2025).
12. Xu B, Li H, Pang W, et al. Bayesian network approach to fault diagnosis of a hydroelectric generation system. *Energy Sci Eng*. 2019;7:1669–1677. <https://doi.org/10.1002/ese3.383>.
13. Guoqiang L., Zengru D., Ying F. Cascading failures in complex networks with community structure. *International Journal of Modern Physics C(IJMPC)*, World Scientific Publishing Co.Pte. Ltd., 2014;25(5):1-10.
14. <https://doi.org/10.1145/3190507>. Tao Chen, Rami Bahsoon, and Xin Yao. 2018. A Survey and Taxonomy of Self-Aware and Self-Adaptive Cloud Autoscaling Systems. *ACM Comput.Surv*.51,3,Article 61.June 2018:40.

References:

1. Newman S. *Creation of microservices*. 2nd ed. – St. Petersburg: Peter, 2023 – 624 p.
2. Kendall D. Stochastic processes occurring in queue theory and their analysis by the nested Markov chain method. *Matematika*. 1959; 3(6):97-112.
3. Tsyarkin Ya.Z. *Fundamentals of the theory of automatic systems*. Moscow: Nauka, 1977. 560 p.
4. Abraham I., Alvisi L., Halpern J. Distributed computing and game Theory: Combining knowledge from two fields. *ACM SIGACT News*. 2011;42(2): 69-76.
5. Mao H., Alizadeh M., Menache I., Kandula S. Resource management through deep reinforcement learning. *Proceedings of the 15th ACM Seminar on current topics in networks*. 2016:50-56.
6. Taran V.N. Bayesian networks for modeling complex systems. *Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, CTS* St. Petersburg, 25–27 October 2017. St. Petersburg, 2017; 240-243. DOI 10.1109/CTSIS.2017.8109535. EDN XXUEQX.
7. Koller D., Friedman N. *Probabilistic graphical models: principles and methods*. Publishing House of the Massachusetts Institute of Technology, 2009;1266 p.
8. Pearl J. *Probabilistic reasoning in intelligent systems: plausible conclusion networks*. California: Morgan Kaufman, 1988.
9. Ilyin V.A., Poznyak E.G. *Fundamentals of mathematical analysis. Part I.*, Moscow, 1998, pp. 248-251.
10. Amosov A.A., Dubinsky Yu.A., Kopchenova N.P. *Computational Methods for Engineers*, Moscow: Mir, 1998.
11. Kubernetes documentation. Horizontal module of automatic scaling [Electronic resource]. URL: <https://kubernetes.io/docs/tasks/run-application/horizontal-pod-autoscale/> (publication date 07/26/2025).
12. Xu B., Li H., Pang U. et al. Bayesian network approach to fault diagnosis of hydroelectric power plants. *Energy Science*, 2019;7:1669-1677. <https://doi.org/10.1002/ese3.383>.
13. Guoqiang L., Zengru D., Ying F. Cascading failures in complex networks with a community structure. *International Journal of Modern Physics C(IJMPC)*, World Scientific Publishing Co.Pte.Ltd.2014;25(5)1-10.
14. <https://doi.org/10.1145/3190507>. Tao Chen, Rami Bahsoon, and Xin Yao. 2018. A Survey and Taxonomy of Self-Aware and Self-Adaptive Cloud Autoscaling Systems. *ACM Comput.Surv*.51,3,Article 61.June 2018:40.

Сведения об авторе:

Четвертухин Виктор Романович, аспирант, кафедра программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем; victor.chet@mail.ru; ORCID 0009-0003-6110-1227

Information about author:

Viktor R. Chetvertukhin, Graduate Student, Department of Computer Engineering and Automated Systems Software; victor.chet@mail.ru; ORCID 0009-0003-6110-1227

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов/The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 20.08.2025.

Одобрена после рецензирования/Reviced 29.10.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 26.01.2026.

Распределение ресурсов защиты автоматизированных систем органов внутренних дел Российской Федерации и их реализация

А.И. Янгиров¹, Е.А. Рогозин², И.В. Атласов³, С.Б. Ахлюстин²

¹ ФКУ «НИЦ «Охрана» Росгвардии,

¹111539, г. Москва, ул. Реутовская, 12Б, Россия,

² Воронежский институт МВД России,

²394065, г. Воронеж, проспект Патриотов, 53, Россия,

³ Московский университет МВД России имени В.Я. Кикотя,

³117997, г. Москва, ул. Академика Волгина, д. 12, Россия

Резюме. Цель. Формирование надежной системы безопасности АС ОВД РФ требует рационального распределения ресурсов. В работе рассматривается подход к определению приоритетов при реализации защитных мер. **Метод.** Исследование основано на анализе данных из банка данных угроз ФСТЭК России, а также на изучении научных публикаций, специализированной литературы и интернет-источников. **Результат.** Предложен вариант распределения ресурсов защиты автоматизированных систем органов внутренних дел Российской Федерации (далее – АС ОВД РФ), а также рассмотрены возможные варианты мер защиты. Представлен подход к распределению ресурсов безопасности для АС ОВД РФ, а также предложены возможные варианты защитных мероприятий. **Вывод.** Отмечается необходимость применения комплексного подхода к обеспечению защиты АС ОВД РФ с применением не только программных, но и аппаратных средств защиты.

Ключевые слова: информационная система, приоритизация, органы внутренних дел, распределение ресурсов, меры защиты

Для цитирования: А.И. Янгиров, Е.А. Рогозин, И.В. Атласов, С.Б. Ахлюстин. Распределение ресурсов защиты автоматизированных систем органов внутренних дел Российской Федерации и их реализация. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(1):193-199. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-193-199

Allocation of resources for the protection of automated systems of the internal affairs bodies of the Russian Federation and their implementation

A.I. Yangirov¹, E.A. Rogozin², I.V. Atlasov³, S.B. Akhlyustin²

¹ FSI «SRC «OKHRANA» of the Federal service of National Guard of Russia,

¹ 12B Reutovskaya St., Moscow 111539, Russia,

² Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia,

² 53 Patriots Ave. Voronezh 394065, Russia,

³ V.Y. Kikot Moscow University of Russian Ministry of Internal Affairs,

³ 12 Akademika Volgina St., Moscow 117997, Russia

Abstract. Objective. Building a reliable security system for the automated systems of the internal affairs agencies of the Russian Federation requires a rational allocation of resources. This paper examines an approach to determining priorities in the implementation of protective measures. **Method.** This study is based on an analysis of data from the FSTEC of Russia's threat database, as well as a review of scientific publications, specialized literature, and online sources. **Result.** A proposed approach to allocating security resources for automated systems of the Russian Federation's internal affairs agencies (hereinafter referred to as the RF IAS) is presented, and possible protective measures are discussed. An approach to allocating security resources for the RF

IAS is presented, along with possible protective measures. **Conclusion.** The need for a comprehensive approach to ensuring the protection of the RF IAS is emphasized, utilizing both software and hardware protection.

Keywords: information system, prioritization, internal affairs agencies, allocation of resources, protection measures.

For citation: A.I. Yangirov, E.A. Rogozin, S.B. Akhlyustin. Allocation of resources for the protection of automated systems of the internal affairs bodies of the Russian Federation and their implementation. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):193-199. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-193-199.

Введение. BIOS (Basic Input-Output System) и его современный аналог UEFI (Unified Extensible Firmware Interface) являются ключевыми компонентами в процессе загрузки многих АС ОВД РФ. Эти компоненты, выполняющие критически важные функции инициализации оборудования и запуска операционной системы (ОС,) с каждым годом становятся все более привлекательными целями для злоумышленников.

На этом этапе злоумышленники могут внедрить вредоносный код, который останется незамеченным для традиционных средств защиты. BIOS (или UEFI), будучи низкоуровневым программным обеспечением, уязвим к различным видам атак.

Атаки можно разделить на три категории: внешние угрозы; внутренние угрозы; угрозы, вызванные техническими сбоями.

К внешним угрозам относятся атаки, осуществляемые удаленно или через физический доступ к оборудованию.

Например, эксплуатация уязвимостей в сетевых интерфейсах, позволяющих злоумышленнику модифицировать прошивку без прямого контакта с устройством. Особую опасность представляют атаки, направленные на подмену кода BIOS до загрузки ОС. Методы подобные Bootkit или Rootkit позволяют злоумышленникам сохранять работоспособность вредоносных программ даже после переустановки ОС. Одной из последних подобных атак стала обнаруженная в 2018 году уязвимость в UEFI, позволяющая выполнять код через поддельные обновления [1].

К внутренним угрозам могут быть отнесены действия инсайдеров или применение вредоносного программного обеспечения, которое уже получило привилегии в системе. Например, вредоносные программы, способные перезаписать BIOS через уязвимости в драйверах или системных утилитах.

Угрозы, вызванные техническими сбоями, также могут повлиять на работоспособность системы и защиты АС ОВД РФ. Ошибки в коде BIOS (или UEFI), сбой питания или некорректные обновления могут привести к повреждению прошивки, что сделает устройство неработоспособным или уязвимым для последующих атак.

Постановка задачи. Разработка эффективной стратегии защиты АС ОВД РФ требует научно обоснованного подхода к распределению ресурсов. В настоящем исследовании рассматривается приоритизация при распределении мер защиты.

Методы исследования. Исследование основано на анализе угроз из банка данных ФСТЭК России, а также различных источников научной литературы, публикаций и интернет-ресурсов.

Обсуждение результатов. Вопросы защиты автоматизированных систем рассматривались в следующих исследованиях [2-4]. Базовые системы ввода-вывода современных компьютеров представляют собой сложные программно-аппаратные комплексы, уязвимости в которых могут быть использованы для реализации особо опасных атак.

В отличие от угроз ОС, атаки на BIOS/UEFI обладают рядом уникальных особенностей, делающих их исключительно опасными.

1. Они действуют на более низком уровне, чем традиционное вредоносное программное обеспечение;

2. Компрометация BIOS/UEFI сохраняется даже после переустановки ОС или замены жесткого диска;
3. Современные BIOS/UEFI обладают сетевыми возможностями, что потенциально позволяет проводить атаки удаленно.

Современные исследования демонстрируют несколько ключевых векторов атак на BIOS/UEFI. Наиболее распространенным является модификация прошивки с целью внедрения постоянно действующего вредоносного кода. Такие атаки могут осуществляться как с физическим доступом к оборудованию, так и через уязвимости в механизмах обновления прошивки. Другим опасным сценарием является подмена или модификация модулей BIOS/UEFI, которые могут выполняться на ранних этапах загрузки системы.

Приоритезация защитных мер должна учитывать не только частоту угроз, но и их потенциальный ущерб. Хотя угроз BIOS/UEFI значительно меньше, чем угроз ОС, их реализация может привести к не менее катастрофическим последствиям.

Поэтому защита BIOS требует качественно иных подходов, часто включающих аппаратные решения. Современные системы защиты BIOS/UEFI должны обеспечивать три ключевых функции: контроль целостности прошивки, защиту от несанкционированной модификации и механизмы безопасного восстановления.

Разработка эффективной стратегии защиты требует научно обоснованного подхода к распределению ресурсов. Основываясь на данных ФСТЭК России, можно вывести оптимальное соотношение мер защиты [5].

В банке данных угроз ФСТЭК России по состоянию на 26.04.2025 г. 222 угрозы. Угрозы в банке данных угроз ФСТЭК России представлены в следующих видах (рис. 1-3). К каждой из 222 угроз представлено описание с указанием того, откуда могут поступать эти самые угрозы (от внешних нарушителей, от внутренних нарушителей или от внешних и внутренних нарушителей).

УБИ.001: Угроза автоматического распространения вредоносного кода в грид-системе		Вид ▾
Описание угрозы	Угроза заключается в возможности внедрения и запуска вредоносного кода от имени доверенного процесса на любом из ресурсных центров грид-системы и его автоматического распространения на все узлы грид-системы. Данная угроза обусловлена слабостями технологии грид-вычислений – высоким уровнем автоматизации при малой администрируемости грид-системы. Реализация данной угрозы возможна при условии наличия у нарушителя привилегий легального пользователя грид-системы	
Источники угрозы	Внешний нарушитель со средним потенциалом Внутренний нарушитель со средним потенциалом	
Объект воздействия	Ресурсные центры грид-системы	
Последствия реализации угрозы	Нарушение конфиденциальности Нарушение целостности Нарушение доступности	

Рис. 1 – Вариант представления угроз в банке данных угроз ФСТЭК России

Fig. 1 – Option for representing threats in the FSTEC of Russia threat database

УБИ.002: Угроза агрегирования данных, передаваемых в грид-системе		Вид ▾
Описание угрозы	Угроза заключается в возможности раскрытия нарушителем защищаемой информации путём выявления задействованных в её обработке узлов, сбора, анализа и обобщения данных, перехватываемых в сети передачи данных грид-системы. Данная угроза обусловлена слабостью технологии грид-вычислений – использованием незащищённых каналов сети Интернет как транспортной сети грид-системы. Реализация данной угрозы возможна при условии наличия у нарушителя: сил и средств, достаточных для компенсации чрезвычайной распределённости грид-заданий между узлами грид-системы; привилегий, достаточных для перехвата трафика сети передачи данных между элементами (узлами) грид-системы	
Источники угрозы	Внешний нарушитель со средним потенциалом	
Объект воздействия	Сетевой трафик	
Последствия реализации угрозы	Нарушение конфиденциальности	

Рис. 2 – Вариант представления угроз в банке данных угроз ФСТЭК России

Fig. 2 – Option for representing threats in the FSTEC of Russia threat database

УБИ.004: Угроза аппаратного сброса пароля BIOS		Вид ▾
Описание угрозы	Угроза заключается в возможности сброса паролей, установленных в BIOS/UEFI без прохождения процедуры авторизации в системе путём обесточивания микросхемы BIOS (съёма аккумулятора) или установки перемычки в штатном месте на системной плате (переключение «джампера»). Данная угроза обусловлена уязвимостями некоторых системных (материнских) плат – наличием механизмов аппаратного сброса паролей, установленных в BIOS/UEFI. Реализация данной угрозы возможна при условии наличия у нарушителя физического доступа к системному блоку компьютера	
Источники угрозы 🟢	Внутренний нарушитель с низким потенциалом	
Объект воздействия	Микропрограммное и аппаратное обеспечение BIOS/UEFI	
Последствия реализации угрозы	Нарушение целостности	

Рис. 3 – Вариант представления угроз в банке данных угроз ФСТЭК России

Fig. 3 – Option for representing threats in the FSTEC of Russia threat database

Также, кроме представленных вариантов, есть угрозы, которые не поступают от внешних или внутренних нарушителей (рис. 4), а могут возникнуть сами по себе из-за технического сбоя или ошибок (человеческого фактора).

УБИ.148: Угроза сбоя автоматического управления системой разграничения доступа хранилища больших данных		Вид ▾
Описание угрозы	Угроза заключается в возможности возникновения ситуаций, связанных с ошибками автоматического назначения пользователям прав доступа (наделение дополнительными полномочиями, ошибочное наследование, случайное восстановление «неактивных» учётных записей т.п.). Данная угроза обусловлена слабостями мер контроля за большим количеством (от тысячи, а в некоторых случаях и до нескольких миллионов) учётных записей пользователей со стороны администраторов безопасности. Реализация данной угрозы возможна при условии возникновения сбоев или ошибок в работе системы разграничения доступа хранилища больших данных	
Объект воздействия	Информационная система, система разграничения доступа хранилища больших данных	
Последствия реализации угрозы	Нарушение конфиденциальности Нарушение доступности	

Рис. 4 – Вариант представления угроз в банке данных угроз ФСТЭК России

Fig. 4 – Option for representing threats in the FSTEC of Russia threat database

Если учитывать откуда могут поступить эти угрозы от внешнего нарушителя, от внутреннего нарушителя или из-за различных ошибок, то общее количество угроз возрастает до 321 из них: внешние угрозы: 166; внутренние угрозы: 153; угрозы из-за технического сбоя, ошибок (человеческого фактора): 2.

На открытые ОС могут быть воздействия, в том числе, через BIOS/UEFI, с помощью простого физического воздействия, а не только программным, аппаратным или программно-аппаратным способом. А значит, при защите открытых ОС должны быть, в том числе приняты и такие меры, которые бы позволяли защититься от таких угроз.

Из этих 321 угрозы на BIOS могут повлиять 18. А на физическую защиту в базе данных ФСТЭК представлена 1 единственная угроза (рис. 5).

УБИ.139: Угроза преодоления физической защиты		Вид ▾
Описание угрозы	Угроза заключается в возможности осуществления нарушителем практически любых деструктивных действий в отношении дискредитируемой информационной системы при получении им физического доступа к аппаратным средствам вычислительной техники системы путём преодоления системы контроля физического доступа, организованной в здании предприятия. Данная угроза обусловлена уязвимостями в системе контроля физического доступа (отсутствием замков в помещении, ошибками персонала и т.п.). Реализация данной угрозы возможна при условии успешного применения нарушителем любого из методов проникновения на объект (обман персонала, взлом замков и др.)	
Источники угрозы 🟢	Внешний нарушитель со средним потенциалом	
Объект воздействия	Сервер, рабочая станция, носитель информации, аппаратное обеспечение	
Последствия реализации угрозы	Нарушение конфиденциальности Нарушение целостности Нарушение доступности	

Рис. 5 – Угроза преодоления физической защиты в банке данных угроз ФСТЭК России

Fig. 5 – Threat to overcome physical security in the FSTEC of Russia threat database

Полученные статистические значения могут быть использованы в рамках методики количественной оценки защищенности открытых ОС [6] в процентном соотношении:

- 1) угрозы, воздействующие на открытую ОС: 302 (94%);
- 2) угрозы, воздействующие на BIOS: 18 (5,6%);
- 3) угроза физического воздействия: 1 (0,31%).

Исходя из произведенных расчетов, 94% мер следует направлять на защиту ОС, 5,6% – на обеспечение безопасности BIOS/UEFI, и 0,31% – на физическую защиту.

Основной объем защитных мер, как показывает статистика, должен быть направлен на обеспечение безопасности ОС. Современные подходы к защите ОС включают многоуровневую систему безопасности, сочетающую превентивные, детективные и реагирующие меры. Наиболее эффективными являются системы мониторинга целостности, обеспечивающие контроль критически важных системных файлов, реестра и конфигураций.

Особое внимание уделяется механизмам разграничения доступа и минимальных привилегий. Современные ОС реализуют сложные модели управления правами пользователей, позволяющие минимизировать потенциальный ущерб от компрометации учетных записей. Важным компонентом защиты являются системы обнаружения вторжений, анализирующие аномальную активность и подозрительное поведение процессов.

Защита базовой системы ввода-вывода требует специальных аппаратных решений, так как традиционные программные методы неэффективны на этапе до загрузки ОС. Одним из наиболее перспективных направлений является использование доверенных платформенных модулей (TPM), которые могут хранить криптографические ключи и обеспечивать проверку целостности прошивки (рис. 6).

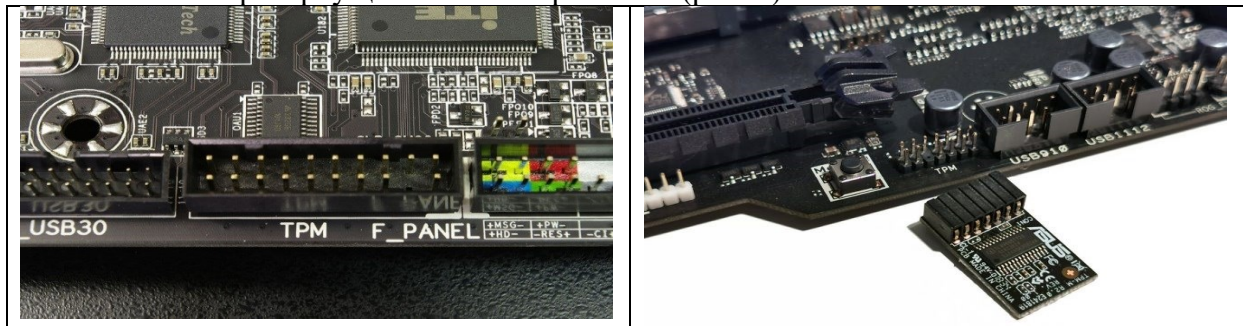


Рис. 6 – Доверенный платформенный модуль (TPM)

Fig. 6 – Trusted Platform Module (TPM)

Современные подходы к защите BIOS/UEFI включают несколько ключевых технологий. Технология безопасной загрузки (Secure Boot) обеспечивает проверку цифровых подписей всех компонентов, загружаемых до ОС.

Аппаратные механизмы защиты от записи в чип BIOS/UEFI предотвращают несанкционированную модификацию прошивки. Решения на основе изолированных исполняемых сред (Trusted Execution Environment) позволяют выполнять критические операции защиты в безопасном окружении.

Хотя угрозы физического уровня составляют лишь небольшую долю от общего числа, их важность нельзя недооценивать. Физическая безопасность включает несколько аспектов: контроль доступа к оборудованию, защиту от перехвата данных через побочные каналы, противодействие аппаратным закладкам. Особое значение физическая защита приобретает в условиях, когда злоумышленник может получить непосредственный доступ к оборудованию.

Современные подходы к физической защите включают использование специализированных корпусов с датчиками вскрытия, системы видеонаблюдения и контроля доступа, защитные покрытия, затрудняющие физический анализ чипов.

Для критически важных систем применяются методы активного противодействия, включая механизмы самоуничтожения данных при попытке несанкционированного доступа. Например, Transcend предлагает SATA 3 SSD в различных форм-факторах,

которые могут поставляться с функцией аппаратного стирания для возможности быстрого и безопасного стирания данных (рис. 7).

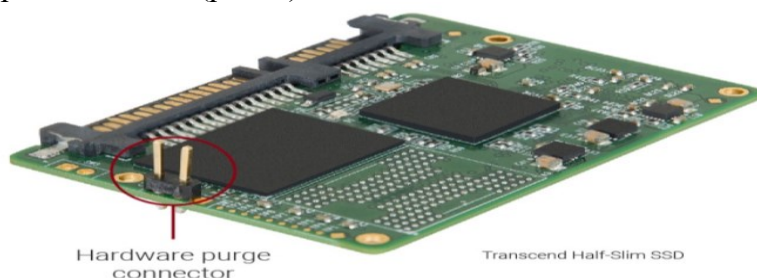


Рис. 7 – SATA 3 SSD с функцией аппаратного стирания
Fig. 7 – SATA 3 SSD with hardware erase function

При замыкании контактов аппаратного стирания, активируется функция быстрого стирания, и все данные, записанные на накопитель, полностью стираются. Стертые данные не подлежат восстановлению, это значит, что вся конфиденциальная информация была уничтожена [7].

Эффективная защита АС ОВД РФ требует не просто набора отдельных мер, а их тщательной интеграции в единый комплекс. Особое внимание должно уделяться взаимодействию между защитными механизмами разных уровней.

Например, система защиты BIOS/UEFI может быть согласована с механизмами безопасности ОС, создавая непрерывную цепочку доверия от момента включения питания до полной загрузки системы. Развитие технологий защиты должно идти параллельно с эволюцией угроз. Одним из наиболее перспективных направлений является использование технологий искусственного интеллекта и машинного обучения для прогнозирования и предотвращения атак. Эти технологии особенно эффективны для анализа больших объемов данных безопасности и выявления сложных аномалий.

Другим перспективным направлением может стать развитие концепции «нулевого доверия» (Zero Trust), которая предполагает постоянную проверку всех компонентов системы, независимо от их местоположения или предполагаемого уровня доверия. Эта концепция особенно актуальна для защиты BIOS/UEFI и других низкоуровневых компонентов.

Вывод. Проведенные исследования демонстрируют необходимость комплексного подхода к защите АС ОВД РФ, учитывающего как количественные показатели угроз, так и их качественные характеристики. Хотя статистика показывает, что основное внимание следует уделять защите ОС, безопасность BIOS/UEFI также требует особых, часто аппаратных решений, несмотря на меньшую долю соответствующих угроз.

Оптимальная стратегия защиты должна основываться на тщательном анализе рисков, учитывающем как вероятность реализации угроз, так и потенциальный ущерб. При этом особое внимание следует уделять интеграции защитных механизмов разных уровней, создавая единую, взаимосвязанную систему безопасности. Предлагаемый системный подход может обеспечить надежную защиту современных АС ОВД РФ от большинства известных угроз.

Библиографический список:

1. LoJax: первый известный UEFI руткит, используемый во вредоносной кампании // ESET URL: https://www.esetnod32.ru/upload/iblock/24b/03.10.2018-LoJax_pervyy-izvestnyy-UEFI-rutkit_ispolzuemu-vo-vredonosnoy-kampanii.pdf (дата обращения: 26.04.2025).
2. Мониторинг операционной системы как средство защиты информации / А.Ю. Лабинский // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). – 2024. – № 1(49). – С.16-23. DOI 10.61260/2307-7476-2024-1-16-23. EDN RKKXYG.
3. Защита персонального компьютера на уровне / Е.Н. Дорожкин // Информационные технологии обеспечения комплексной безопасности в цифровом обществе: сборник материалов IV Всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием, Уфа, 21–22 мая 2021 года. – Уфа: Башкирский государственный университет, 2021. – С. 192-194. – EDN FYFTNZ.

4. Подход к повышению уровня доверия к аппаратно-программным платформам информационных систем критически важных инфраструктур в целях предупреждения компьютерных атак с использованием уязвимостей в ПО BIOS / А.Ю. Боровиков, О.А. Маслов, С. Е. Кузнецов, И.А. Козлов // Наноиндустрия. – 2021. – Т. 14, № S7(107). – С. 338-339. – DOI 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.338.339. – EDN KDYCTC.
5. Банк данных угроз безопасности информации – [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <https://bdu.fstec.ru/> (Дата обращения: 26.04.2025).
6. Методический подход к количественной оценке защищенности открытых операционных систем АС ОВД / А.И. Янгиров, И.М. Янгиров, Е.А. Рогозин, С.Б. Ахлюстин // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(3):163-171. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-3-163-171>.
7. Аппаратное уничтожение данных // Transcend Information. Inc. URL: <https://ru.transcend-info.com/embedded/technology/hardware-purge> (дата обращения: 26.04.2025).

References:

1. LoJax: the first known UEFI rootkit used in a malicious campaign // ESET URL: https://www.esetnod32.ru/upload/iblock/24b/03.10.2018-LoJax_pervyy-izvestnyy-UEFI-rutkit_-ispolzue-myuy-vo-vredonosnoy-kampanii.pdf (date of request: 04.26.2025).
2. Monitoring of the operating system as a means of information protection / A.Y. Labinsky. *Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects)*. 2024;1(49):16-23. DOI 10.61260/2307-7476-2024-1-16-23. – EDN RKKXYG.
3. Personal computer protection at the level / E.N. Dorozhkin // Information technologies for ensuring integrated security in a digital society: collection of materials of the IV All-Russian Youth Scientific and Practical Conference with international participation, Ufa, May 21-22, 2021. Ufa: Bashkir State University, 2021;192-194. EDN FYFTNZ.
4. An approach to increasing the level of trust in hardware and software platforms of information systems of critical infrastructures in order to prevent computer attacks using vulnerabilities in BIOS software / A.Y. Borovikov, O.A. Maslov, S.E. Kuznetsov, I.A. Kozlov. *Nanoindustria*. 2021;14(S7(107)):338-339. – DOI 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.338.339. – EDN KDYCTC.
5. Data bank of information security threats – [Electronic resource] – Access mode. – URL: <https://bdu.fstec.ru/> / (Date of request: 04.26.2025).
6. Methodological approach to quantitative assessment of the security of open operating systems AS of the Internal Affairs Bodies. A.I. Yangirov, I.M. Yangirov, E.A. Rogozin, S.B. Akhlyustin. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2024;51(3):163-171. (In Russ) DOI.org/10.21822/2073-6185-2024-51-3-163-171.
7. <https://ru.transcend-info.com/embedded/technology/hardware-purge> (date of request: 04.26.2025). Hardware data destruction. *Transcend Information. Inc.*

Сведения об авторах:

Адил Илдарович Янгиров, начальник отделения лабораторных исследований и испытаний; adil-yan@yandex.ru

Евгений Алексеевич Рогозин, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных информационных систем ОВД; evgenirogozin@yandex.ru

Атласов Игорь Викторович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры естественнонаучных дисциплин учебно-научного комплекса информационных технологий; mathematic1@rambler.ru

Ахлюстин Сергей Борисович, кандидат технических наук, начальник кафедры тактико-специальной подготовки, Воронежский институт МВД России; serg7676@yandex.ru

Information about authors:

Adil I. Yangirov, Head of the Laboratory Research and Testing; adil-yan@yandex.ru

Evgeny A. Rogozin, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Prof., Department of Automated Information Systems of Internal Affairs Bodies; evgenirogozin@yandex.ru

Igor V. Atlasov, Dr. Sci. (Physico-Mathemat.), Assoc. Prof., Prof., Department of Natural Sciences of the Educational and Scientific Complex of Information Technologies, Sciences; mathematic1@rambler.ru

Sergey B. Ahlyustin, Cand. Sci. (Eng.), Head of the department of tactical and special training; serg7676@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 20.06.2025.

Одобрена после рецензирования/Reviced 17.08.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 16.01.2026.

Гибридная методология прогнозирования несущей способности внецентренно сжатых прямоугольных трубобетонных колонн

С.Х. Аль-Згуль, Т.Н. Кондратьева, Б.М. Языев, А.С. Чепурненко

Донской государственный технический университет,
344000, г. Ростов-на-Дону, площадь Гагарина, 1, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка гибридной методологии прогнозирования несущей способности внецентренно сжатых прямоугольных трубобетонных колонн, основанную на интеграции аналитических расчетных моделей, нелинейного конечно-элементного моделирования и методов машинного обучения. **Метод.** Исследование базируется на комбинированном вычислительном подходе, включающем предварительную аналитическую оценку по методу предельного равновесия и уточняющий нелинейный конечно-элементный анализ с использованием теории пластичности бетона Гениева и итерационной схемы Ньютона–Рафсона. Сформирован синтетический датасет, примененный для машинного обучения CatBoost с использованием метрики RMSLE. **Результат.** Разработан алгоритм генерации и валидации расчетной базы данных, обеспечивающий физическую обоснованность и репрезентативность обучающей выборки. Сформирован структурированный датасет, охватывающий широкий диапазон геометрических и прочностных параметров колонн. Полученная модель машинного обучения демонстрирует высокую точность прогнозирования предельной несущей способности при внецентренном сжатии. **Вывод.** Разработанная гибридная методология позволяет с высокой точностью прогнозировать несущую способность трубобетонных колонн при внецентренном сжатии за счет объединения аналитических моделей, конечно-элементного анализа и машинного обучения. Полученные результаты могут быть использованы для создания цифровых инструментов расчета и оптимизации конструкций, а также для совершенствования существующих инженерных методик.

Ключевые слова: трубобетонные колонны (ТБК), гибридная методология, внецентренное сжатие, конечно-элементное моделирование, машинное обучение, CatBoost, несущая способность

Для цитирования: С.Х. Аль-Згуль, Т.Н. Кондратьева, Б.М. Языев, А.С. Чепурненко. Гибридная методология прогнозирования несущей способности внецентренно сжатых прямоугольных трубобетонных колонн. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(1):200-213. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-200-213.

A Hybrid Methodology for Predicting the Load-Bearing Capacity of Rectangular Concrete-Filled Steel Tube Columns Under Eccentric Compression

S.Kh. Al-Zgul, T.N. Kondratieva, B.M. Yazyev, A.S. Chepurnenko

Don State Technical University,
1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia

Abstract. Objective. To develop a hybrid methodology for predicting the load-bearing capacity of rectangular concrete-filled steel tube (CFST) columns under eccentric compression, based on the integration of analytical calculation models, nonlinear finite-element modeling, and machine learning techniques. **Method.** The study is based on a combined computational approach that includes a preliminary analytical assessment using the limit equilibrium method and a refining nonlinear finite-element analysis employing Geniev's theory of concrete plasticity

and the Newton–Raphson iterative scheme. A synthetic dataset was generated from the obtained results and used to train a CatBoost machine learning model, with performance evaluated using the Root Mean Squared Logarithmic Error (RMSLE) metric. **Result.** An algorithm for the generation and validation of a computational database was developed, ensuring the physical plausibility and representativeness of the training sample. A structured dataset was formed, covering a wide range of geometric and strength parameters of the columns. The resulting machine learning model demonstrates high accuracy in predicting the ultimate load-bearing capacity under eccentric compression. **Conclusion.** The developed hybrid methodology enables high-accuracy prediction of the load-bearing capacity of CFST columns under eccentric compression by combining analytical models, finite-element analysis, and machine learning. The obtained results can be used to create digital tools for structural analysis and optimization, as well as to improve existing engineering design practices.

Keywords: concrete-filled steel tube columns (CFST), hybrid methodology, eccentric compression, finite-element modeling, machine learning, CatBoost, load-bearing capacity

For citation: S.Kh. Al-Zgul, T.N. Kondratieva, B.M. Yazyev, A.S. Chepurnenko. A hybrid methodology for predicting the load-bearing capacity of rectangular concrete-filled steel tube columns under eccentric compression. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):200-213. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-200-213.

Введение. Трубобетонные колонны в настоящее время рассматриваются как один из наиболее эффективных видов несущих элементов благодаря синергетической работе стальной оболочки и бетонного ядра. Замкнутая стальная труба создаёт условия трёхосного сжатия бетона, что повышает его прочность и деформационную способность, тогда как сталь выполняет функции продольного и поперечного армирования, повышая пластичность, трещиностойкость и общую надёжность конструкции. В результате обеспечивается высокая несущая способность, устойчивость к динамическим [1] и сейсмическим воздействиям [2], а также повышенная огнестойкость [3] и долговечность по сравнению с традиционными стальными и железобетонными элементами. Дополнительным преимуществом является снижение усадочных деформаций бетона вследствие его изоляции стальной оболочкой, что положительно влияет на эксплуатационные характеристики конструкций [4].

С технологической точки зрения использование стальной трубы в качестве несъёмной опалубки упрощает процесс возведения, сокращает трудоёмкость и ускоряет монтажные работы. Экономическая эффективность трубобетонных колонн обусловлена рациональным расходом материалов, сокращением сроков строительства и снижением стоимости устройства несущих каркасов, что определяет их широкое применение в современной строительной практике [5].

Высокая эффективность трубобетонных элементов одновременно обуславливает необходимость их точного расчёта, поскольку несущая способность определяется сложным взаимодействием материалов, нелинейным характером деформирования и разнообразием схем нагружения. В инженерной практике для этих целей применяются аналитические нормативные методики, экспериментальные исследования и численное моделирование, прежде всего конечно-элементный анализ. Каждый из этих подходов обладает определёнными преимуществами и ограничениями, что стимулирует развитие комбинированных методов расчёта [6].

Существенный вклад в развитие теории и расчёта трубобетонных конструкций внесли сформировавшиеся научные школы. В отечественной науке фундаментальные исследования связаны с работами Л.И. Стороженко и его последователей – В.Н. Кибенко, В.М. Сурдина, Б.Н. Шевченко [7], а также исследований магнитогорской научной группы под руководством А.Л. Кришана – А.С. Мельничука, К.С. Кузнецова, А.И. Сагадатов, А.А. Сахарова, С.А. Харченко, М.А. Астафьевой [8]. Развитие отдельных аспектов прочности и долговечности трубобетона отражено в работах С.В. Коврыги, Б.Н. Нурадинова, В.А. Шеховцова, И.В. Резвана, Г.М. Мартиросова, К.Н. Хажхожева и др. Существенный

вклад в развитие расчётных моделей внесли также зарубежные исследователи Min Yu, Xiaoxiong Zha, Jianqiao Ye и Yuting Li.

Экспериментальные, аналитические и численные методы различаются по точности, трудоёмкости и применимости, что определяет особенности их использования и ограничения. Экспериментальные исследования обеспечивают наибольшую достоверность [9], однако требуют значительных временных и финансовых ресурсов, что ограничивает объём доступных данных и затрудняет систематическое изучение влияния параметров. Кроме того, существующие экспериментальные базы [10] носят фрагментарный характер, особенно для прямоугольных трубобетонных колонн и элементов из высокопрочных материалов, что снижает надёжность обобщений за пределами исследованных диапазонов. Аналитические модели удобны для инженерного применения, но основаны на ряде упрощающих предпосылок, которые не всегда позволяют корректно учитывать нелинейность работы материалов и сложные механизмы взаимодействия стали и бетона. Численные методы способны обеспечить высокую точность и детальное описание напряжённо-деформированного состояния, но требуют значительных вычислительных ресурсов, а результаты существенно зависят от выбора моделей материалов и параметров контактного взаимодействия [11, 12].

Параллельно с развитием традиционных подходов в последние годы активно развиваются методы машинного обучения [13–19], включая ансамблевые алгоритмы (Random Forest, XGBoost, CatBoost) и нейросетевые технологии (ANN), позволяют выявлять скрытые нелинейные зависимости между конструктивными параметрами и несущей способностью на основе экспериментальных и численных данных. Однако использование исключительно дата-ориентированных моделей без учёта физической природы процессов снижает интерпретируемость результатов и ограничивает надёжность прогнозов при экстраполяции. Особенно актуальны эти вопросы при расчёте трубобетонных колонн, находящихся в условиях внецентренного сжатия. Для таких элементов напряжённо-деформированное состояние характеризуется выраженной нелинейностью, неравномерным распределением деформаций и высокой чувствительностью к величине и направлению эксцентриситета нагрузки. Несмотря на значительное количество исследований влияния эксцентриситета продольной силы, основное внимание уделено колоннам круглого сечения, тогда как прямоугольные трубобетонные элементы изучены существенно меньше, что ограничивает применимость существующих расчётных моделей и требует дальнейшего развития [20].

Постановка задачи. Наиболее перспективным представляется гибридный подход, интегрирующий традиционные инженерные методы с алгоритмами машинного обучения. Такой подход сочетает физическую интерпретируемость аналитических зависимостей, детализированность конечно-элементного анализа и предсказательный потенциал методов искусственного интеллекта, обеспечивая более надёжное и оперативное определение несущей способности внецентренно сжатых прямоугольных трубобетонных колонн. Разработка и верификация гибридной методологии прогнозирования несущей способности внецентренно сжатых прямоугольных трубобетонных колонн, объединяющей аналитические зависимости, численное моделирование и методы машинного обучения для повышения точности и универсальности расчётов.

Методы исследования. Исследование посвящено разработке гибридной методологии, объединяющей три взаимосвязанных уровня моделирования: упрощённые аналитические расчётные зависимости, нелинейное конечно-элементное моделирование и последующее применение методов машинного обучения (рис. 1). В контексте машинного обучения ключевым этапом, предопределяющим успешность построения прогнозной модели, является формирование достоверного, верифицированного и валидированного датасета. Качество и репрезентативность исходной базы данных напрямую определяют адекватность, обобщающую способность и практическую применимость обученной модели. Достоверность обеспечивается корректностью физико-математических моделей, используемых для генерации синтетических данных; верификация выполнялась путём сопоставления результатов с авторскими аналитическими решениями [21, 22],

проверенными на экспериментальных данных независимых исследований и фундаментальными принципами механики, а валидация заключалась в отбраковке численных артефактов и физически нереалистичных сочетаний параметров.

Для формирования обучающей выборки разработан комбинированный алгоритм генерации синтетических данных, реализованный в виде последовательного вычислительного конвейера: формирование пространства параметров и аналитическая предварительная оценка по методу предельного равновесия; нелинейный конечно-элементный анализ поперечного сечения с уточнением предельной несущей способности и валидацией результатов; построение структурированного датасета и его последующее разбиение на обучающую, валидационную и тестовую подвыборки для обучения модели машинного обучения и её интерпретации.

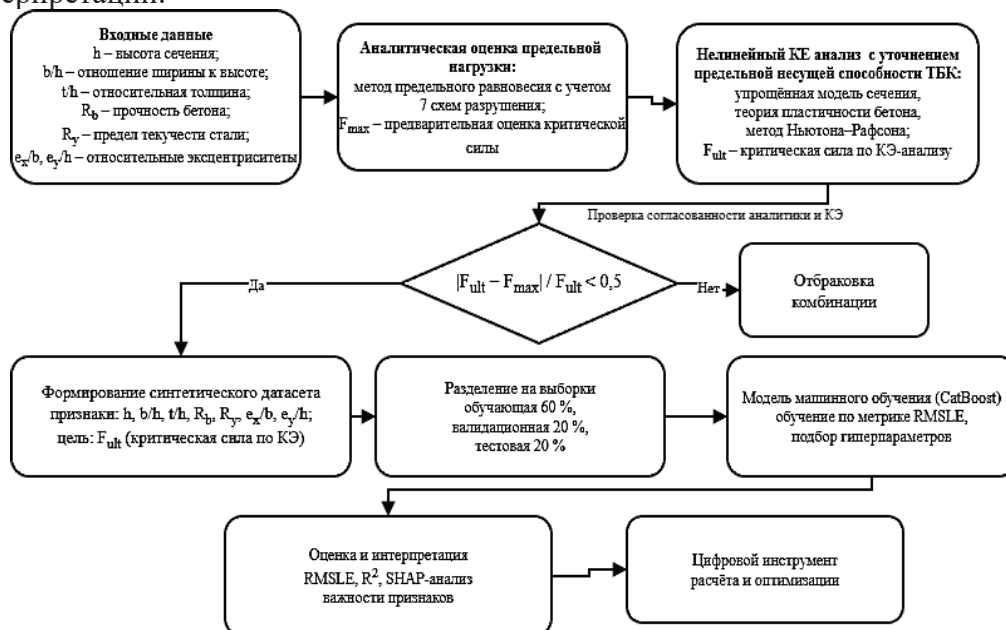


Рис. 1 – Гибридная модель расчёта несущей способности трубобетонных колонн
 Fig. 1 – Hybrid model for calculating the bearing capacity of reinforced concrete columns

Такой подход позволяет объединить вычислительную эффективность аналитических методов с высокой физической достоверностью численного моделирования и обеспечить надёжную основу для построения прогностической модели.

В рамках первого этапа вычислительного конвейера осуществляется формирование пространства параметров и аналитическая предварительная оценка несущей способности. Задаётся пространство исследуемых параметров, охватывающее диапазоны геометрических, прочностных и нагрузочных характеристик внецентренно нагруженных прямоугольных трубобетонных колонн. Варьируются следующие величины: высота прямоугольного сечения h , отношение ширины к высоте a/h , относительная толщина стенки t/h , призматическая прочность бетона на сжатие R_b , предел текучести стали R_y , а также относительные эксцентриситеты нагрузки e_x/b и e_y/h . Дискретизация этих параметров формирует регулярную сетку входных комбинаций, покрывающую практически применяемые области проектирования. Для каждой точки пространства параметров выполняется аналитическая оценка предельной осевой силы F_{max} , по методу предельного равновесия, основанному на допущениях о постоянстве напряжений в сжатой зоне бетона ($\sigma_b = R_b$), идеальной упругопластичности стальной обоймы ($\sigma_s = \pm R_y$), прямолинейности нейтральной линии и пренебрежении приростом прочности от бокового обжатия и эффектами местной потери устойчивости [23]. Рассматривается набор идеализированных схем разрушения поперечного сечения, соответствующих различным положениям нейтральной линии и конфигурациям сжатых и растянутых зон бетона и стали. Для каждой схемы записываются уравнения равновесия; решения которых дают предельную продольную силу и положение

нейтральной линии. Из всех возможных решений выбирается минимальное значение F , удовлетворяющее геометрическим ограничениям (нейтральная линия внутри сечения) и условию $F \geq 0$. В частных случаях внецентренного сжатия вокруг одной оси и центрального сжатия используются упрощённые аналитические выражения. Если для конкретной комбинации параметров вещественное аналитическое решение отсутствует, применяется консервативная оценка несущей способности при центральном сжатии как суммы вкладов бетонного ядра и стальной обоймы. На выходе этого этапа формируются аналитическая оценка предельной силы F_{max} и номер реализовавшейся схемы разрушения.

Расчёт проводится для семи схем разрушения прямоугольного сечения трубобетонной колонны с учётом заданных эксцентриситетов e_x и e_y , соответствующих различному положению нейтральной линии. Все семь принципиальных схем разрушения, описанные в [21, 22], разделяются на две группы. К первой группе относятся четыре основные схемы, при которых нейтральная линия пересекает две противоположные стороны сечения: схема 1 (стороны 1 и 3), схема 2 (стороны 1 и 4), схема 3 (стороны 2 и 4) и схема 4 (стороны 2 и 3) (рис. 2).

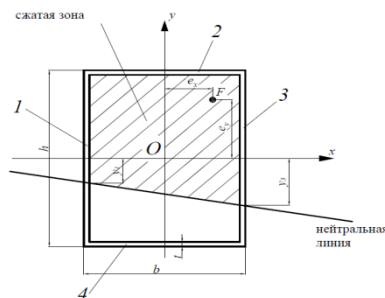


Рис. 2 – Пример положения нейтральной линии (схема 1) в поперечном сечении колонны для аналитической оценки предельной сжимающей силы

Fig. 2 – Example of the neutral axis position (Scheme 1) in the column cross-section for the analytical evaluation of the ultimate compressive force

Ко второй группе относятся три частных (вырожденных) случая: схема 5, реализующаяся при $e_x = 0$, когда сжатая зона охватывает всё бетонное ядро, а на растяжение работает только сторона 4 стальной обоймы; схема 6, возникающая при $e_y = 0, e_x \neq 0$, при которой растягивается только сторона 1; и схема 7 – случай центрального сжатия ($e_x = e_y = 0$). Из полученных решений выбирается физически реализуемое значение F_{max} , обеспечивающее выполнение условий равновесия и геометрических ограничений. Блок-схема алгоритма аналитической оценки предельной нагрузки на рис. 3.

На следующем этапе, предназначенном для уточнения величины предельной нагрузки, расчёт выполняется по упрощённой конечно-элементной модели прямоугольных трубобетонных при внецентренном сжатии в двух плоскостях (рис. 4). Трёхмерная задача сводится к двумерной в плоскости поперечного сечения [22] с использованием гипотезы плоских сечений [1], согласно которой продольная деформация в произвольной точке с координатами (x, y) описывается выражением:

$$\varepsilon_z(x, y) = \varepsilon_z^0 + y\chi_1 + x\chi_2.$$

Связь между внутренними усилиями (продольной силой N , изгибающими моментами M_x, M_y) и обобщёнными деформациями $\varepsilon_0, \chi_1, \chi_2$ задаётся матричным соотношением:

$$\begin{Bmatrix} N \\ M_x \\ M_y \end{Bmatrix} = [D_1] \begin{Bmatrix} \varepsilon_z^0 \\ \chi_1 \\ \chi_2 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} N^* \\ M_x^* \\ M_y^* \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

где

$$[D_1] = \begin{bmatrix} EA & ES_x & ES_y \\ ES_x & EI_x & EI_{xy} \\ ES_y & EI_{xy} & EI_y \end{bmatrix}$$

Аналитическая оценка предельной нагрузки F_{max}

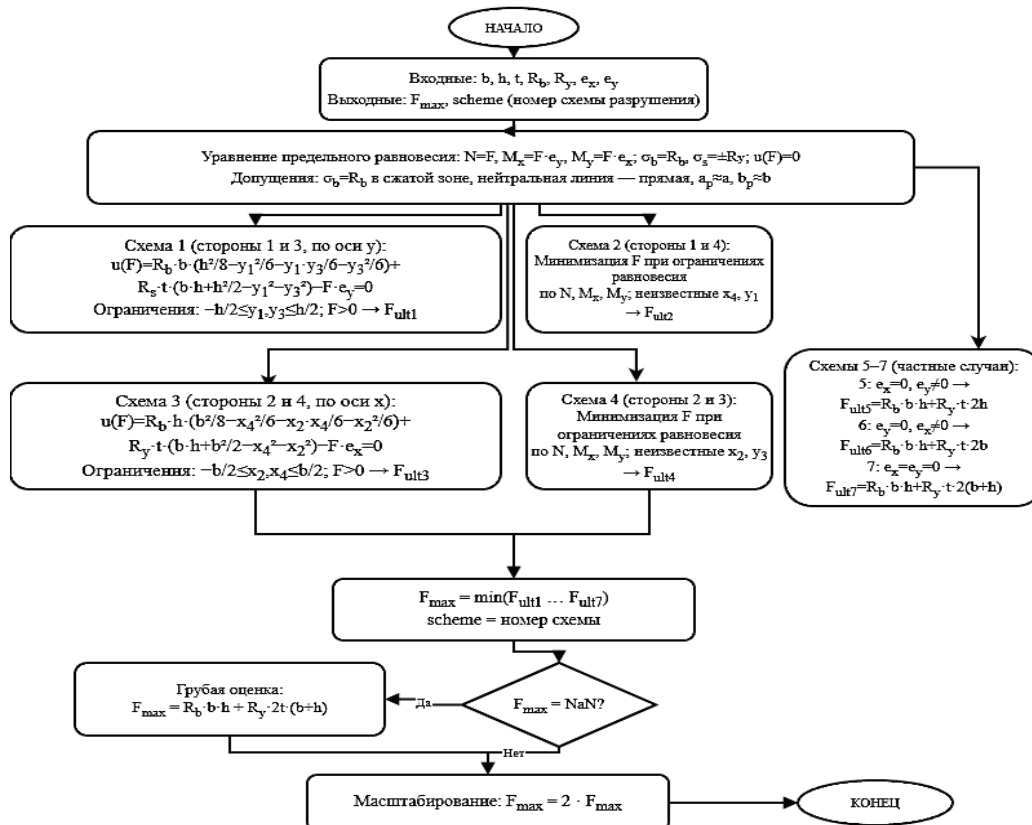


Рис. 3 – Блок-схема алгоритма аналитического метода определения предельной сжимающей силы в рамках гибридной модели расчёта несущей способности ТБК

Fig. 3 – Flowchart of the analytical algorithm for determining the ultimate compressive force within the hybrid model for predicting the load-bearing capacity of CFST columns

Здесь матрица жёсткости сечения $[D_1]$ включает обобщённые характеристики жёсткости приведённого (эквивалентного) сечения EA , ES_x , ES_y , EI_x , EI_y , EI_{xy} , а вектор $\{N^*, M_x^*, M_y^*\}^T$ учитывает дополнительные усилия от вынужденных (в том числе дилатационных) деформаций. Эти величины определяются интегрированием по площади бетонного ядра и по контуру стальной оболочки с использованием текущих касательных модулей упругости бетона и стальной оболочки, которые изменяются по мере развития нелинейности.

Напряжённо-деформированное состояние в поперечном сечении определяется решением двумерной конечно-элементной задачи: бетон моделируется прямоугольными конечными элементами, стальная оболочка - стержневыми элементами. После исключения продольного напряжения σ_z из уравнений упругости получается система, в которой напряжения выражаются через деформации. Итоговая система МКЭ имеет вид

$$[K]U = \{F\} + \{F^*\}, \quad (2)$$

где $[K]$ - глобальная матрица жёсткости, $\{U\}$ - вектор узловых перемещений в плоскости сечения, $\{F\}$ - вектор, зависящий от обобщённых деформаций, $\{F^*\}$ - вектор, зависящий от вынужденных деформаций.

По найденному вектору $\{U\}$ определяются поля напряжений и деформаций в бетоне и стали. В качестве модели материала для бетона нами используются уравнения деформационной теории пластичности бетона Г.А. Гениева [24]. Для стали принимается диаграмма «напряжения-деформации» идеального упругопластического материала с критерием текучести Губера-Мизеса-Генки. С целью учета физической нелинейности материала расчёт выполняется методом последовательного увеличения нагрузки от нуля до удвоенного значения предельной нагрузки $2F_{max}$, полученной аналитически на первом этапе гибридной модели, с шагом

$$\Delta F = \frac{2F_{\max}}{200}, \quad (3)$$

Коэффициент 2 введён для возможности учёта прироста несущей способности за счёт бокового обжатия бетона стальной обоймой. На первом шаге модули упругости материалов принимаются равными начальным значениям, а дилатационные деформации не учитываются. На каждом последующем шаге применяется итерационный процесс Ньютона–Рафсона: по текущим касательным модулям определяются матрица $[D_1]$ и вектор дополнительных усилий, после чего задаётся вектор приращения обобщённых усилий:

$$\{\Delta F\} = \{\Delta N, \Delta M_x, \Delta M_y\}^T + \{N^*, M_x^*, M_y^*\}^T, \quad (4)$$

Соответствующие приращения обобщённых деформаций определяются из выражения:

$$\{\Delta \varepsilon\} = [D_1]^{-1} \{\Delta F\}, \quad \{\Delta \varepsilon\} = \{\Delta \varepsilon_0, \Delta \chi_1, \Delta \chi_2\}^T, \quad (5)$$

Далее решается двумерная конечно-элементная задача, уточняются напряжения и пересчитываются касательные модули материалов. На основе обновлённого состояния формируется скорректированная матрица $[D'_1]$ и вычисляется невязка сил:

$$\delta F = \Delta F - [D'_1] \Delta \varepsilon, \quad (6)$$

характеризующая остаточный дисбаланс между заданным приращением усилий и внутренним откликом сечения. Вектор поправки обобщённых деформаций определяется как:

$$\{\delta \varepsilon\} = [D'_1]^{-1} \{\delta F\}, \quad (7)$$

после чего выполняется обновление решения:

$$\Delta \varepsilon := \Delta \varepsilon + \delta \varepsilon, \quad (8)$$

В качестве критерия сходимости используется условие относительного изменения вектора поправок либо достижение заданного числа итераций:

$$\frac{\|\delta \varepsilon^{(j)} - \delta \varepsilon^{(j-1)}\|}{\|\delta \varepsilon^{(j)}\|} \cdot 100 \quad (9)$$

После достижения сходимости обновляются накопленные значения $\varepsilon_z^0, \chi_1, \chi_2$ и расчёт переходит к следующему шагу нагружения. Предельная нагрузка фиксируется при достижении условия:

$$|\varepsilon_z^0| \geq 0.01, \quad (10)$$

что соответствует экспериментально обоснованному предельному состоянию с учётом статистического разброса [8].

Описанный выше алгоритм уточнения предельной сжимающей силы, блок-схема которого приведена на рис. 4, положен в основу формирования синтетического датасета для последующего обучения модели машинного обучения. Входными параметрами при этом служат геометрические и физико-механические характеристики колонны: высота прямоугольного сечения h , отношение ширины к высоте сечения b/h , отношение толщины стенки к высоте t/h , призмная прочность бетона R_b , предел текучести стали R_y , а также относительные эксцентриситеты приложения продольной силы e_x/b и e_y/h . Для каждой комбинации параметров сначала выполняется аналитическая оценка $F_{\max}$ и определяется схема разрушения, затем проводится нелинейный конечно-элементный расчёт, в результате которого получают уточнённое значение F_{ult} . Для исключения численных артефактов из датасета удаляются комбинации, для которых расхождение между F_{ult} и аналитической оценкой превышает 50%. В итоге формируется согласованный набор данных, охватывающий семь схем нагружения и основанный на комбинированном алгоритме, объединяющем обеспечивает одновременно вычислительную эффективность и физическую достоверность. Алгоритм создания датасета (табл. 1) реализован в среде MATLAB с использованием параллельных вычислений. Сформированный датасет был разделён на независимые подвыборки для обучения, валидации и тестирования модели. Сначала из исходного набора 20% наблюдений были выделены в тестовую выборку; оставшиеся 80 % использовались для обучения и валидации. Эта часть была дополнительно разделена в соотношении 75% к 25%,

в результате чего итоговые доли составили 60% - обучающая выборка, 20% - валидационная и 20% - тестовая от объёма исходного датасета. В качестве алгоритма машинного обучения выбран CatBoost, показавший в ряде исследований высокую точность прогнозирования несущей способности композитных конструкций [15–17].

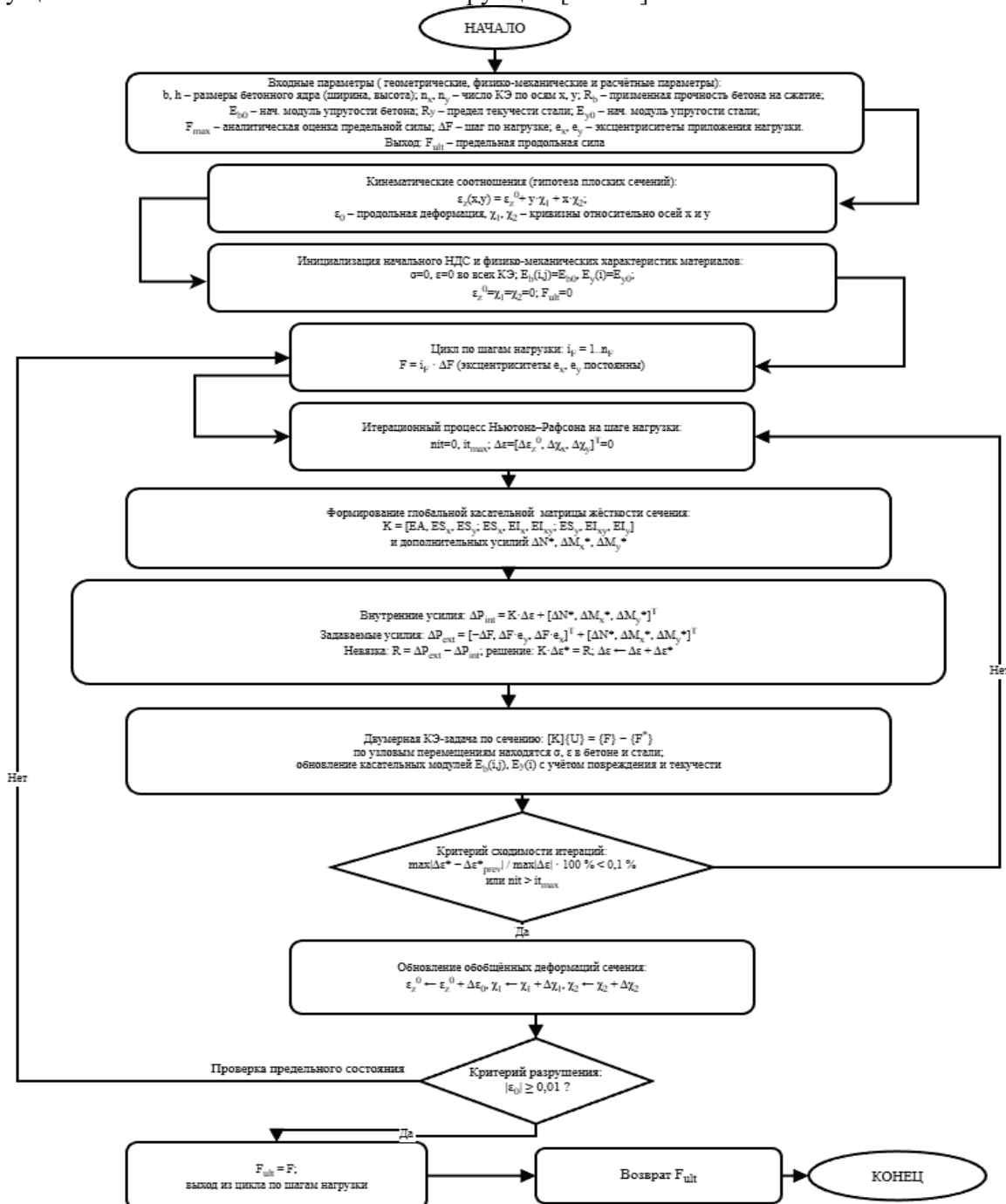


Рис. 4 – Блок-схема алгоритма уточнения предельной сжимающей силы МКЕ в рамках гибридной модели расчёта несущей способности ТБК

Fig. 4 – Flowchart of the algorithm for refining the ultimate compressive force within the framework of the hybrid model for calculating the load-bearing capacity of CFST columns

Алгоритм поддерживает эффективное кодирование категориальных признаков (Ordered Target Encoding) без предварительной ручной настройки, в отличие от XGBoost и LightGBM, требующих отдельного этапа кодирования (one-hot, порядковое и т.п.), и снижает риск таргет-утечки за счёт расчёта статистик по категориям в порядке, задаваемом обучающей выборкой. Встроенные механизмы регуляризации уменьшают склонность модели к переобучению, что существенно при последующей интеграции в конвейеры автоматического машинного обучения (AutoML).

Таблица 1. Фрагмент сгенерированного датасета для ТБК
Table 1. Fragment of the generated dataset for CFST columns

h	b/h	t/h	R_b	R_y	e_x/b	e_y/h	F_{ult}
100	0,4	0,015	10	230	0,5	0,5	47,36623
100	0,4	0,015	10	230	0,406	0,5	49,67724
100	0,4	0,015	10	230	0,5	0,406	51,17435
100	0,4	0,015	10	230	0,312	0,5	52,77702
100	0,4	0,015	10	334	0,312	0,5	53,44376
100	0,52	0,015	10	230	0,5	0,5	54,27666
100	0,4	0,015	10	230	0,218	0,5	55,57849
100	0,4	0,015	10	230	0,5	0,312	55,95671
100	0,4	0,015	10	230	0,406	0,406	56,71842
100	0,76	0,015	10	334	0,5	0,5	57,14
100	0,52	0,015	10	230	0,5	0,03	57,36042
...	...	...	...	...	...	...	...
500	1	0,085	21	750	0,03	0,03	57177,7
500	1	0,071	65	750	0,03	0,03	57569,33
500	0,88	0,085	65	750	0,03	0,03	57996,55
500	1	0,085	32	750	0,03	0,03	58776,4
500	0,88	0,085	54	750	0,03	0,03	58813,75
500	1	0,085	43	750	0,03	0,03	60323,06
500	1	0,085	54	750	0,03	0,03	62544,98
500	1	0,085	65	750	0,03	0,03	63260,35
500	1	0,085	21	750	0,218	0,124	63948,37
500	0,4	0,085	21	542	0,03	0,03	67667,53
500	1	0,085	65	750	0,124	0,124	71465,77

В качестве целевой переменной использовалась предельная сжимающая сила F_{ult} ; остальные параметры (геометрия, прочностные характеристики, эксцентриситеты) выступали предикторами. Реализация выполнена на языке Python (версия 3.9 и выше) с использованием библиотеки CatBoost. Проведено сравнение двух функций потерь: RMSE и RMSLE. Целевая переменная F_{ult} имеет широкий диапазон значений (от порядка 10^1 до 10^4 кН), поэтому применение RMSE, из-за квадратичного штрафа за ошибку, приводит к чрезмерному влиянию наблюдений с большими значениями на функцию потерь и к смещению модели в сторону минимизации ошибки именно для них в ущерб точности на основной массе данных. В связи с этим в качестве основной метрики и функции потерь при обучении принята RMSLE (Root Mean Square Logarithmic Error):

$$\text{RMSLE}(y^{\text{true}}, y^{\text{pred}}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\ln(1 + y_i^{\text{pred}}) - \ln(1 + y_i^{\text{true}}))^2}, \quad (11)$$

где y_i^{true} - истинное значение целевой переменной для i -го наблюдения, y_i^{pred} – предсказанное моделью значение, N - число наблюдений. Логарифмическое преобразование шкалы снижает влияние выбросов и обеспечивает более сбалансированный вклад ошибок для наблюдений разного масштаба, что повышает устойчивость обучения при сильном разбросе целевой переменной.

Обсуждение результатов. На рис. 5 представлено сравнение фактических и прогнозируемых значений предельной продольной силы F_{ult} для тестовой выборки, полученных с использованием разработанной модели машинного обучения.

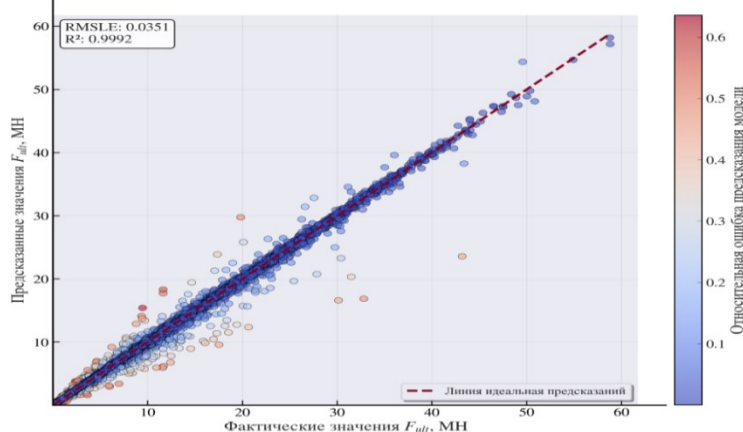


Рис. 5 – Точность прогнозирования несущей способности ТБК
Fig. 5 – Prediction accuracy of CFST column load-bearing capacity

Диаграмма рассеяния демонстрирует высокую степень согласованности между расчётными (фактическими) и предсказанными значениями: большинство точек сосредоточено вблизи идеальной линии $y = x$, что свидетельствует о хорошей аппроксимирующей способности модели на независимых данных. Количественная оценка точности подтверждается высокими значениями метрик качества: коэффициент детерминации $R^2 = 0,9992$ указывает на практически полное объяснение дисперсии целевой переменной, а среднеквадратичная логарифмическая ошибка $\text{RMSLE} = 0,0351$ свидетельствует о низком уровне относительной ошибки прогнозирования.

Цветовая шкала, отражающая отношение прогнозируемого значения к фактическому, позволяет визуальнo оценить распределение погрешностей по диапазону нагрузок. Наибольшие отклонения наблюдаются преимущественно в области малых и средних значений нагрузки, тогда как при увеличении F_{ult} рассеяние уменьшается, что указывает на стабильность модели в зоне высоких нагрузок. Вместе с тем для отдельных наблюдений фиксируется повышенный разброс ошибок, достигающий 50–60%. Данный разброс, вероятно, обусловлен присутствием в синтетическом датасете аномальных записей. При его формировании использовался фиксированный деформационный критерий прекращения расчета ($|\varepsilon_z^0| \geq 0,01$) без дополнительного анализа диаграмм «нагрузка–деформация», что могло привести к включению в выборку численных артефактов и физически малореалистичных сочетаний параметров. Несмотря на это, общая точность и обобщающая способность разработанной прогностической модели остаются на высоком уровне, что подтверждает её применимость для оценки несущей способности трубобетонных колонн.

Дополнительное понимание поведения модели получено на основе анализа важности признаков с использованием метода SHAP (SHapley Additive exPlanations), результаты которого представлены на рис. 6.

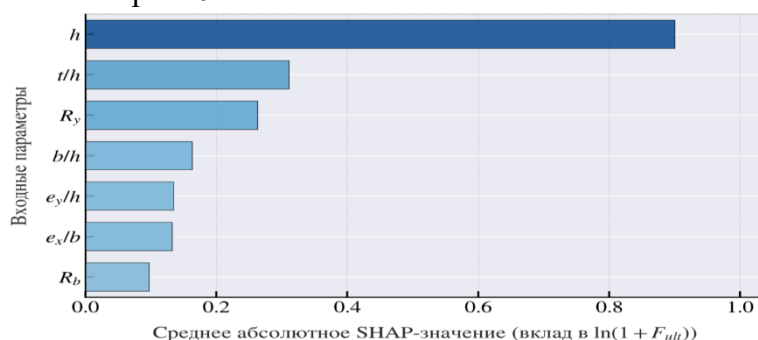


Рис. 6 – Важность признаков с использованием метода SHAP

Fig. 6 – Feature importance based on the SHAP method

В отличие от эвристических метрик важности, SHAP-анализ опирается на теорию кооперативных игр Шепли, что обеспечивает свойства согласованности и точности при распределении вклада между признаками. Расчёт SHAP-значений выполнен на репрезентативной подвыборке объёмом 1000 наблюдений: согласно двухвыборочному тесту Колмогорова–Смирнова. Распределения признаков в данной подвыборке статистически значимо не отличаются от распределений в полном датасете ($p > 0,05$).

Согласно полученным результатам, наибольший вклад в прогноз вносит высота сечения h , существенно превосходя по значимости все остальные параметры. Это полностью согласуется с механической природой задачи: несущая способность внецентренно сжатого элемента определяется изгибной жёсткостью сечения, которая для прямоугольного профиля пропорциональна кубу высоты ($I \propto h^3$).

Следующими по значимости являются относительная толщина стенки t/h и предел текучести стали R_y , отражающие вклад несущей способности стальной оболочки. Параметры b/h , а также относительные эксцентриситеты e_x/a и e_y/b характеризуются умеренным влиянием, что соответствует их роли в формировании напряжённо-деформированного состояния при внецентренном сжатии. Наименьшее значение среднего SHAP-вклада

зафиксировано для призмной прочности бетона R_b , что свидетельствует о сравнительно меньшей чувствительности модели к изменению прочностных характеристик бетонного ядра в рассматриваемом диапазоне параметров. Полученные результаты подтверждают физическую согласованность разработанной модели, поскольку наиболее значимыми оказываются геометрические характеристики сечения и параметры стальной оболочки, определяющие несущую способность трубобетонного элемента.

Анализ ошибки модели (RMSLE) по диапазонам целевой переменной F_{ult} выявил неоднородность качества прогноза (рис. 7). На большей части диапазона средняя ошибка меняется относительно плавно; в области максимальных значений F_{ult} наблюдается заметный рост ошибки. В этот участок попадают в том числе артефактные записи синтетического датасета, для которых комбинации параметров не соответствуют физически реализуемым условиям и приводят к завышенным значениям F_{ult} . Обучение на таких противоречивых примерах ухудшает аппроксимацию в данной области и объясняет локальный всплеск ошибки.

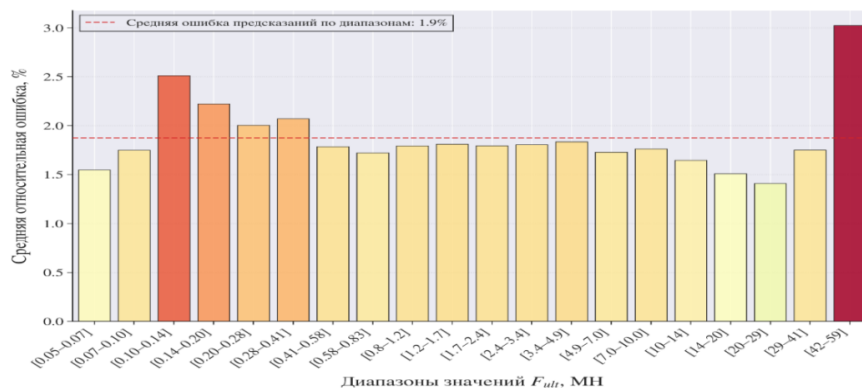


Рис. 7 – Средняя ошибка предсказаний по диапазонам значений целевой переменной F_{ult}

Fig. 7 – Average prediction error across ranges of the target variable F_{ult}

В процессе обучения модели проанализирована эволюция значения функции потерь RMSLE в зависимости от номера итерации алгоритма. Полученные кривые (рис. 8) отражают динамику изменения ошибки на обучающей и валидационной выборках и позволяют оценить сходимость алгоритма и его обобщающую способность. На начальном этапе наблюдается интенсивное снижение значения функции потерь, что свидетельствует о быстром выявлении моделью основных зависимостей между входными параметрами и целевой переменной. По мере увеличения числа итераций темп уменьшения ошибки снижается, и после приблизительно 80–100 итераций кривые выходят на стационарный участок, стабилизируясь на практически постоянном уровне. Близость траекторий для обучающей и валидационной выборок указывает на отсутствие выраженного переобучения и подтверждает устойчивость модели при прогнозировании. В целом характер кривых свидетельствует о корректной настройке гиперпараметров алгоритма и надёжной сходимости процесса обучения.

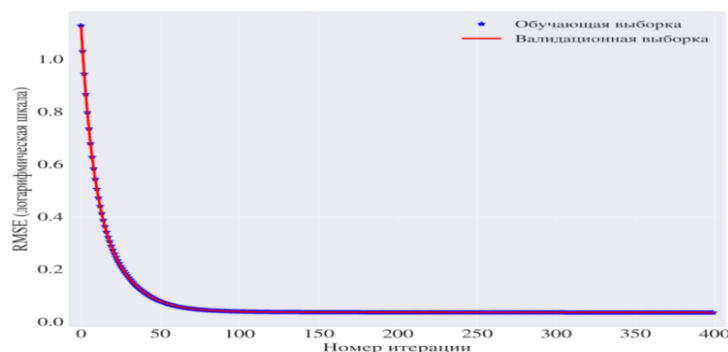


Рис. 8 – Динамика изменения значения функции потерь RMSLE в процессе обучения модели

Fig. 8 – Convergence of the RMSLE loss function for the training and validation datasets during model training

Вывод. Проведённое исследование подтвердило эффективность разработанной гибридной методологии прогнозирования несущей способности внецентренно сжатых прямоугольных трубобетонных колонн, основанной на интеграции аналитических зависимостей, нелинейного конечно-элементного моделирования и алгоритмов машинного обучения. Трёхэтапная структура подхода позволяет сочетать физическую интерпретируемость механических моделей, детализированность численного анализа и предсказательную мощь алгоритмов искусственного интеллекта.

Ключевым результатом работы является разработка алгоритма генерации синтетического датасета, обеспечившего создание репрезентативной и физически достоверной обучающей выборки. Особое внимание уделялось фильтрации данных для исключения численных артефактов и физически нереалистичных сочетаний параметров. Сформированный датасет охватывает широкий диапазон геометрических и прочностных характеристик колонн, семь схем разрушения поперечного сечения, характерных для двухосного внецентренного сжатия, и обеспечивает применимость модели для различных проектных ситуаций и комбинаций параметров.

Построенная на базе CatBoost регрессионная модель показала высокую точность прогнозирования ($\text{RMSLE} = 0,0351$, $R^2 = 0,9992$) и устойчивость к вариациям параметров. Анализ кривых RMSLE продемонстрировал корректную сходимость алгоритма и отсутствие переобучения, а SHAP-анализ подтвердил физическую осмысленность прогнозов, выделив доминирующее влияние высоты сечения h , относительной толщины стенки t/h и предела текучести стали R_y . Локальное увеличение ошибки в области максимальных значений F_{ult} связано с единичными артефактами синтетического датасета и особенностями деформационного критерия, что указывает на перспективность дальнейшего совершенствования качества данных.

Предложенная методология обеспечивает быстрый многовариантный анализ и предварительную оптимизацию сечений трубобетонных колонн с существенно меньшими вычислительными затратами по сравнению с прямым КЭ-расчётом, сохраняя интерпретируемость и физическую обоснованность прогнозов. Перспективными направлениями развития являются расширение параметрического диапазона, учёт различных схем нагружения и эксплуатационных воздействий, а также интеграция метода в системы автоматизированного проектирования и цифровые двойники строительных объектов для оперативной оценки несущей способности на всех этапах жизненного цикла.

Библиографический список:

1. Акаев А.И., Магомедов М.Г., Пайзулаев М.М. Перспективы строительства сейсмостойких зданий из трубчатых железобетонных конструкций // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017. -Т. 44,-№ 1. -С. 138–149..
2. Varma A.H. и др. Seismic behavior and modeling of high-strength composite concrete-filled steel tube (CFT) beam-columns // J. Constr. Steel Res. Elsevier, 2002. Т. 58, № 5–8. С. 725–758.
3. George C., Selvan S.S. State of Art—Light Gauge Steel Hollow and in-Filled Columns and Beams under Elevated Temperature // Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2023. Т. 47, № 3. С. 1265–1276.
4. Kikin A.I., Sanjarovskii R.S., Trull V.A. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном. Стройиздат / пер. Kikin. Москва: Стройиздат, 1974. Т. 146. 1–146 с.
5. Кришан А.Л., Кришан М.А., Сабиров Р.Р. Перспективы применения трубобетонных колонн на строительных объектах России // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего ..., 2014. № 1 (45). С. 137–140.
6. Ma Y. Experimental, numerical study and design of concrete-encased concrete-filled steel tube columns and beam-column joints. 2022.
7. Storozhenko L.I. ., Plakhotnyĭ P.I. ., Chernyĭ A.I. . Расчет трубобетонных конструкций. «Будивэльнык», 1991. 119 с.
8. Krishan A.L., Astafeva M.A., Chernyshova E.P. Numerical and Experimental Investigation of Axially Loaded Columns with Spiral Reinforcement // Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 2023. Т. 1087. С. 163–168.

9. Goode C.D. Composite columns-1819 tests on concrete-filled steel tube columns compared with Eurocode 4 // *The Structural Engineer*. 2008. Т. 86, № 16. С. 33–38.
10. GitHub - denavit/Composite-Column-Database: A database of experiments on steel-concrete composite columns [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/denavit/Composite-Column-Database> (дата обращения: 08.07.2025).
11. Saffari H., Davoodi R., Soleymani A. Analyzing elastoplastic behavior and residual strength ratios in steel tubular braces under compression: a numerical investigation // *Innovative Infrastructure Solutions*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2024. Т. 9, № 9.
12. Isleem H.F. и др. Nonlinear finite element and analytical modelling of reinforced concrete filled steel tube columns under axial compression loading // *Results in Engineering*. Elsevier, 2023. Т. 19. С. 101341.
13. Zarringol M., Thai H.-T., Naser M.Z. Application of machine learning models for designing CFCFST columns // *J. Constr. Steel Res.* Elsevier, 2021. Т. 185. С. 106856.
14. Faridmehr I., Nehdi M.L. Predicting axial load capacity of CFST columns using machine learning // *Structural Concrete*. John Wiley and Sons Inc, 2022. Т. 23, № 3. С. 1642–1658.
15. Lee S. и др. Compressive Strength Prediction of CFST Columns Using Machine Learning Methods // *Journal of Korean Society of Steel Construction*. 2022. Т. 34, № 2.
16. Кондратьева Т.Н., Чепурненко А.С. Применение искусственного интеллекта к прогнозированию прочности трубобетонных колонн. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(3):40-48. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-3-40-48>.
17. Кондратьева Т.Н., Чепурненко А.С. Прогнозирование несущей способности трубобетонных колонн квадратного сечения при помощи методов машинного обучения. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(4):44-52. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-44-52>.
18. Hou C., Zhou X. Eccentric compression capacity prediction of rectangular CFST columns based on machine learning // *Jianzhu Jiegou Xuebao/Journal of Building Structures*. 2022. Т. 43.
19. Megahed K., Mahmoud N.S., Abd-Rabou S.E.M. Application of machine learning models in the capacity prediction of RCFST columns // *Sci. Rep. Nature Publishing Group UK London*, 2023. Т. 13, № 1. С. 24.
20. Liu D. Behaviour of eccentrically loaded high-strength rectangular concrete-filled steel tubular columns // *J. Constr. Steel Res.* Elsevier, 2006. Т. 62, № 8. С. 839–846.
21. Al-Zgul S., Tyurina V., Chepurnenko A. A Simplified Method for Determining the Bearing Capacity of Eccentrically Compressed Rectangular CFST Columns with Eccentricities in Two Planes // *The Open Construction & Building Technology Journal*. Bentham Science Publishers Ltd., 2025. Т. 19, № 1.
22. Chepurnenko A. и др. Simplified finite element model for rectangular CFST columns strength calculation under eccentric compression // *Magazine of Civil Engineering*. St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, 2025. Т. 134, № 2. С. 13406–13406.
23. Кришан А.Л., Зайкин А.И., Мельничук А.С. Расчет прочности трубобетонных колонн // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2010. Т. 1. С. 20–25.
24. Litvinov S.V. и др. Study of the concordance between various concrete deformation models and experimental data for uniaxial compression cases // *Construction Materials and Products*. Belgorod V.G. Shukhov State Technology University, 2024. Т. 7, № 5.

References:

1. Akaev A.I., Magomedov M.G., Payzulaev M.M. Prospects of establishing earthquake resistant buildings from tube concrete constructions. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2017;44(1):138–149.
2. Varma A.H. i dr. Seismic behavior and modeling of high-strength composite concrete-filled steel tube (CFT) beam-columns. *J. Constr. Steel Res.* 2002;58(5–8):725–758.
3. George C., Selvan S.S. State of Art—Light Gauge Steel Hollow and in-Filled Columns and Beams under Elevated Temperature. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*. 2023;47(3):1265–1276.
4. Kikin A.I., Sanjarovskii R.S., Trull V.A. Konstruktsii iz stal'nykh trub, zapolnennykh betonom [Structures made of steel tubes filled with concrete] / per. Kikin. Moskva: Stroyizdat, 1974;146:46.
5. Krishan A.L., Krishan M.A., Sabirov R.R. Perspektivy primeneniya trubobetonnykh kolonn na stroitel'nykh ob'yektakh Rossii [Prospects for the application of concrete-filled steel tube columns at construction sites in Russia]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2014;1(45):137–140.
6. Ma Y. Experimental, numerical study and design of concrete-encased concrete-filled steel tube columns and beam-column joints. 2022.
7. Storozhenko L.I., Plakhotnyi P.I., Chernyi A.I. Raschet trubobetonnykh konstruktsiy [Design of concrete-filled steel tube structures]. «Budivelnik», 1991;119.
8. Krishan A.L., Astafeva M.A., Chernyshova E.P. Numerical and Experimental Investigation of Axially Loaded Columns with Spiral Reinforcement. *Materials Science Forum*. 2023;1087:163–168.

9. Goode C.D. Composite columns-1819 tests on concrete-filled steel tube columns compared with Eurocode 4. *The Structural Engineer*. 2008;86(6):33–38.
10. GitHub - denavit/Composite-Column-Database: A database of experiments on steel-concrete composite columns [Elektronnyy resurs]. URL: <https://github.com/denavit/Composite-Column-Database> (data obrashcheniya: 08.07.2025).
11. Saffari H., Davoodi R., Soleymani A. Analyzing elastoplastic behavior and residual strength ratios in steel tubular braces under compression: a numerical investigation. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2024;9:9.
12. Isleem H.F. i dr. Nonlinear finite element and analytical modelling of reinforced concrete filled steel tube columns under axial compression loading. *Results in Engineering*. 2023;19:101341.
13. Zarringol M., Thai H.-T., Naser M.Z. Application of machine learning models for designing CFCFST columns. *J. Constr. Steel Res.* 2021;185:106856.
14. Faridmehr I., Nehdi M.L. Predicting axial load capacity of CFST columns using machine learning. *Structural Concrete*. 2022;23(3):1642–1658.
15. Lee S. i dr. Compressive Strength Prediction of CFST Columns Using Machine Learning Methods. *Journal of Korean Society of Steel Construction*. 2022;34:2.
16. Kondratieva T.N., Chepurnenko A.S. Prediction of the Strength of the Concrete-Filled Tubular Steel Columns Using the Artificial Intelligence. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(3):40–48. (In Russ) <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-3-40-48>.
17. Kondratieva T.N., Chepurnenko A.S. Predicting the Load-Bearing Capacity of Square-Section Pipe-Concrete Columns Using Machine Learning Methods. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(4):44–52. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-44-52>.
18. Hou C., Zhou X. Eccentric compression capacity prediction of rectangular CFST columns based on machine learning. *Jianzhu Jiegou Xuebao/Journal of Building Structures*. 2022;43.
19. Megahed K., Mahmoud N.S., Abd-Rabou S.E.M. Application of machine learning models in the capacity prediction of RCFST columns. *Sci. Rep.* 2023;13(1): 24.
20. Liu D. Behaviour of eccentrically loaded high-strength rectangular concrete-filled steel tubular columns. *J. Constr. Steel Res.* 2006;62(8): 839–846.
21. Al-Zgul S., Tyurina V., Chepurnenko A. A Simplified Method for Determining the Bearing Capacity of Eccentrically Compressed Rectangular CFST Columns with Eccentricities in Two Planes. *The Open Construction & Building Technology Journal*. 2025;19(1).
22. Chepurnenko A. i dr. Simplified finite element model for rectangular CFST columns strength calculation under eccentric compression. *Magazine of Civil Engineering*. 2025;134(2):13406–13406.
23. Krishan A.L., Zaikin A.I., Mel'nichuk A.S. Raschet prochnosti trubobetonnykh kolonn [Calculation of the strength of concrete-filled steel tube columns] *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktiv i sooruzheniy*. 2010;1:20–25.
24. Litvinov S.V. i dr. Study of the concordance between various concrete deformation models and experimental data for uniaxial compression cases. *Construction Materials and Products*. 2024;7(5).

Сведения об авторах:

Аль-Згуль Самир Хусейнович, аспирант кафедры «Строительная механика и теория сооружений»; alzgulsamirfx@gmail.com; 0000-0001-6182-786X.

Кондратьева Татьяна Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Математика и информатика»; ktn618@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-3518-8942

Языев Батыр Меретович, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительная механика и теория сооружений»; ps62@mail.ru; ORCID: 0000-0002-5205-1446.

Чепурненко Антон Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительная механика и теория сооружений»; anton_chepurnenk@mail.ru; ORCID: 0000-0002-9133-8546.

Information about authors:

Samir Kh. Al-Zgul, Postgraduate Student of the Department of Structural Mechanics and Theory of Structures; alzgulsamirfx@gmail.com; ORCID: 0000-0001-6182-786X.

Tatiana N. Kondratieva, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Mathematics and Computer Science; ktn618@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-3518-8942.

Batyr M. Yazyev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Structural Mechanics and Theory of Structures; ps62@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-5205-1446.

Anton S. Chepurnenko, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Structural Mechanics and Theory of Structures; anton_chepurnenk@mail.ru; ORCID: 0000-0002-9133-8546.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 13.11.2025.

Одобрена после рецензирования/Reviced 10.12.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 25.01.2026.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 691.05

DOI: 10.21822/2073-6185-2026-53-1- 214-223



Оригинальная статья /Original article

Использование горелых пород в строительных технологиях

Е.В. Корнеева, В.А. Корнеев

Сибирский государственный индустриальный университет,
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова 42, Россия

Резюме. Цель. В статье представлены результаты исследования горелой породы шахтных отвалов Абашевского угольного месторождения Кузбасса, и возможности их использования в строительных технологиях для решения экологической проблемы, связанной с необходимостью ее утилизации. **Метод.** Исследование основано на эффективном методе переработки минеральных попутных продуктов для последующего вовлечения их в производство строительных материалов - механической активации, за счет которой раскрывается сырьевой потенциал вторичного минерального продукта: изменяется морфология и структура. Развитие удельной поверхности и дефектов в структуре материала, вызванных ростом энергии при измельчении, изменяет его физико-технические, химические и технологические свойства. **Результат.** Комбинированная механоактивация горелой породы совместно со шлаковыми отходами сталеплавильного производства способствует вовлечению силикатной составляющей активируемых продуктов в структурообразование вяжущей системы. **Вывод.** Организация производства строительных смесей различного функционального назначения с использованием горелых пород может решить экологическую проблему по утилизации крупнотоннажных отходов угледобычи и обеспечит экономическую, экологическую и социальную значимость важнейшего ископаемого сырья угольных регионов России.

Ключевые слова: горелые породы, терриконы, вторичное сырье, шахтные отвалы, строительные технологии, техногенные минеральные продукты, механическая активация, бесклнкерные смеси

Для цитирования: Е.В. Корнеева, В.А. Корнеев. Использование горелых пород в строительных технологиях. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(1):214-223. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-214-223.

Use of burnt rocks in construction technologies

E.V. Korneeva, V.A. Korneev

Siberian State Industrial University,
42 Kirov St., Novokuznetsk 654007, Russia

Abstract. Objective. The article presents the results of studies of the burning breed of the mine dumps of the Abashevsky coal deposit of Kuzbass, and the possibility of using in construction technologies to solve the environmental problem related to the need to dispose of it. **Method.** The study is based on an effective method for processing mineral by-products for subsequent use in the production of building materials: mechanical activation, which unlocks the raw material potential of the secondary mineral product by altering its morphology and structure. The development of specific surface area and structural defects in the material, caused by increased energy during grinding, alters its physical, chemical, and technological properties. **Result.** Combined mechanical activity of burning breed, together with slag waste of steeling production, helps to engage the silicate component of activated products in the structural formation of the astringent system. **Conclusion.** The organization of the production of building mixtures of various functional purposes using burned breeds will help to solve the environmental problem to dispose of these large

-capacity waste from coal mining and ensure the economic, environmental and social significance of the most important fossil raw materials of the coal regions of Russia.

Keywords: burnt rocks, coal mining waste hills, secondary raw materials, shaft dumps, construction technologies, technological mineral products, mechanical activation, basket mixtures

For citation: E.V. Korneeva, V.A. Korneev. Use of burnt rocks in construction technologies. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):214-223. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-214-223.

Введение. Горелые породы - перегоревшие отходы добычи угля. Это «пустые» породы, содержащие минимальное количество углистых примесей, которые подаются отдельно и складываются в конусообразные терриконы или отвалы [1-5]. В переводе с французского отвал породы (terri), конический (conique). Содержание углистых примесей отрицательно влияет как на свойства горелой породы, так и на изделия из нее, а именно – снижает долговечность, морозостойкость, водостойкость.

Впервые наиболее обстоятельные научно-исследовательские и опытно-производственные работы по использованию горелых пород в строительной индустрии были выполнены в период 1953-1970 годов, что позволило в угледобывающих регионах бывшего СССР осуществлять их переработку: использовать в дорожном строительстве [6]; при изготовлении керамических изделий в качестве активной добавки к вяжущим [7] и заполнителя в бетонах, позволяющего увеличить марку бетона по прочности, истираемости и морозостойкости [8]. С развитием и совершенствованием технологических приемов переработки техногенных минеральных продуктов стало возможно более эффективно использовать данное ценное сырье:

- при замене цемента (до 35%) горелой породой снижается себестоимость бетонных изделий [9] и увеличивается прочность на сжатие до 25 МПа [10];
- использование горелых пород для устройства конструктивных слоев автомобильных дорог снижает трудоемкость возведения слоев дорожной одежды и уменьшает общую стоимость работ [11];
- производство ограждающих конструкций с использованием горелых пород позволяет при формировании получать строительные изделия с требуемыми физико-механическими и теплотехническими свойствами [12], а при изготовлении силикатного стенового материала получить более плотную упаковку и прочность более 15 МПа. [13];
- впервые с использованием ультразвука на основе горелой породы получены новые композитные материалы [14] с более высокими физическими и механическими свойствами, чем у образцов аналогичного состава без неё.

Один из наиболее эффективных способов переработки минеральных попутных продуктов промышленности - механическая активация. Тонкое измельчение приводит к увеличению удельной поверхности частиц, дегидратации и образованию микродефектов кристаллической структуры, увеличивая их активность [15-21]. В Кузбассе, крупнейшем угольном бассейне России в настоящее время в конусообразных и плоских терриконах уже накоплено около 0,2 млрд. т. горелых пород. В г. Новокузнецке – 2 террикона по 2 млн. м³ на шахте Байдаевская; на шахте Абашевской – 600 тыс. м³. В городе Прокопьевске: шахта «Центральная» - 600 тыс. м³, шахта «Красногорская» – 700 тыс. м³. Комплексный подход к переработке данного ценного сырья позволит формирование сырьевой базы для стройиндустрии региона, способствуя снижению экологической напряженности.

Постановка задачи. Целью работы является реализация возможности использования горелых пород шахтных отвалов угольных месторождений Кузбасса при разработке бесклнкерных смесей общестроительного назначения. Задача исследования: решение проблемы эффективной строительно-технологической утилизации многотоннажных техногенных образований угольных предприятий региона.

Методы исследования. Химический состав горелых пород зависит от свойств исходных пород и степени их обжига и характеризуется значительным колебанием

содержания основных компонентов. Так, по массе содержание CaO может меняться от 0,7 до 11,5%; SiO₂ – от 43 до 77%; MgO – от 0,3 до 7%; FeO – от 0,35 до 1,5%; MnO – от 0 до 0,25%; Al₂O₃ – от 9 до 20%; Fe₂O₃ – от 4 до 6%. В зависимости от температуры обжига изменение пород проявляется в покраснении, ошлаковании и полном переплавлении. Химический анализ горелых пород терриконика шахты «Абашевская», выполненный по ГОСТ 8269.1-97 показал, что они относятся к группе «ультракислых», поскольку содержат повышенное количество SiO₂ и Al₂O₃, K_{осн.} = 0,1 (табл. 1). Пробы из отвала горелых пород шахты «Абашевская» отобраны по линии профиля через 20 м с глубины 0-30 см от его поверхности.

Таблица 1. Химический состав горелых пород терриконика шахты «Абашевская»
Table 1. Chemical composition of burnt rocks of the waste heap of the Abashevskaya mine

Наименование оксидов	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	в т.ч. CaO _{своб.}	MgO	TiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O+Na ₂ O
Массовая доля, % Mass fraction	49,18	17,62	6,52	1,66	0,24	3,79	0,65	7,61	0,81	1,27	0,07	11,23

Исходные материалы для образования горелых пород - метаморфизированные компоненты (природная смесь из углистых и слабоуглистых аргиллитов, алевролитов и песчаников). Угленосные породы, выдаваемые из шахт Кузбасса, неоднородны и состоят из двух разновидностей: чистые породы – 30-40%; смешанные с углем – 60-70%.

Минералогический состав представлен следующим соотношением главных составляющих, %: глинистые сланцы - 48, песчанистые сланцы - 27, песчаники - 20, углистые сланцы - 3, карбонатные породы - 2. Прочностные свойства горелых пород изменяются в зависимости от фракции. Так, фракция щебня 5 - 20 мм соответствует марке 200 - 300 по прочности, а фракция 20 - 40 мм - марке 200 - 600. Физико-механические свойства горелых пород приведены в табл. 2.

Таблица 2. Физико-механические свойства горелых пород
Table 2. Physico-mechanical properties of burnt rocks

Наименование показателей Name of indicators	Величина показателя Value of the indicator
Истинная плотность, г/см ³ True density	2,4 - 2,6
Насыпная плотность, г/см ³ Bulk density	1,4
Средняя плотность, г/см ³ Average density	1,8
Временное сопротивление сжатию, МПа Temporary compressive strength	30,0 - 130,0

Для определения гранулометрического состава из терриконики методом квартования была взята проба, рассеяна через сито с ячейками 5, 10 и 40 мм. Результаты показали, что в породе больше всего содержится мелкой фракции – менее 5 мм (табл. 3).

Таблица 3. Гранулометрический состав горелых пород
Table 3. Granulometric composition of burnt rocks

Фракции, мм Fractions, mm, %	Остаток на сите, % Residue on sieve	Фракции, мм Fractions, mm, %	Остаток на сите, % Residue on sieve
5	36,3	10-40	24,2
5 - 10	13,5	40	26

Наличие повышенного количества мелкой фракции показывает, что часть горелой породы терриконики за время их существования (более 50 лет) подвергнута разложению под действием влаги и мороза. Около 30% пород терриконика имеют стабильный состав и не подверглись разложению. При определении потерь при прокаливании и содержания углерода для отдельных фракций, установлено, что остаточный углерод равномерно распределен во всех фракциях, и его количество не превышает 3%. Несколько выше 5% находится в смеси фракции 10-40 мм. По содержанию радионуклидов горелая порода соответствует первому классу (Аэфф<370) и может использоваться без ограничений (табл. 4).

Таблица 4. Результаты измерения содержания радионуклидов в горелой породе
Table 4. Results of measuring radionuclide content in burnt rock

Определяемые показатели Determined indicators	Результаты исследования (Бк/кг.) Results	Погрешность измерения (Бк/кг.) Error	Допустимый уровень (Бк/кг.) Acceptable level
Калий – 40 /Potassium	298,10	49,13	-
Радий – 226/ Radium	33,56	5,50	-
Торий – 232 /Thorium	41,72	7,70	-
Аэфф/Aeff	192,10	30,20	370,00

По результатам рентгенофазового анализа (рис. 1) горелые породы шахты «Абашевская» содержат 20-25% рентгеноаморфной фазы представленной смесью оксидов SiO_2 и Al_2O_3 – продукта разложения каолинита при нагреве. Преобладают: кварц (SiO_2) – 23-25% и полевые шпаты изоморфного ряда (AlSi_3O_8) – 15-20%. Присутствуют: гематит (Fe_2O_3) – 10-12%; немного: гидрослюда – 7-8% и нерасшифрованная примесь – до 5%.

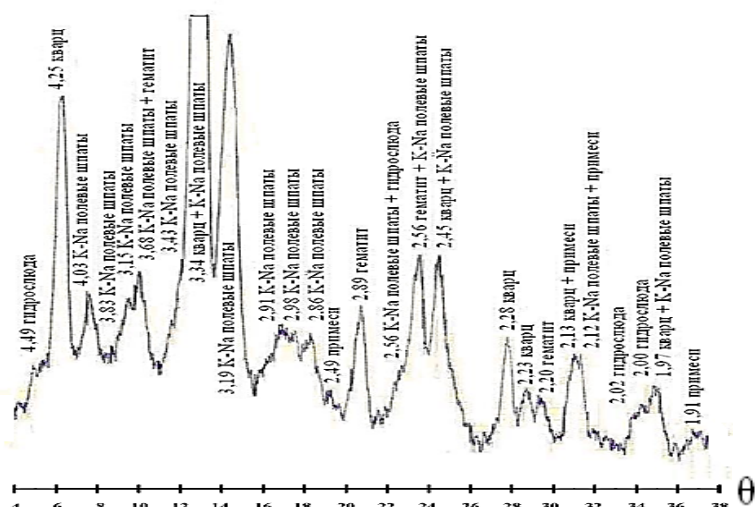


Рис. 1 – Дифрактограмма горелой породы терриконика шахты «Абашевская». Межплоскостные расстояния указаны в 10^{-10} м
Fig. 1 – X-ray diffraction pattern of burnt waste heap rock. Abashevskaya mine
Interplanar distances are indicated in 10^{-10} m

Микроморфология образца горелой породы (рис. 2) представлена в основном аморфной структурой, со слабо выраженными переходами между двумя подструктурами: пластинчатой – образованной слоистыми легкоплавкими (глинистыми) минералами и сферолитовой – образованной преимущественно округлыми частицами диаметром от 1 до 6 мкм. Встречаются обломки крупных частиц от 5 до 10 мкм изометричной формы.

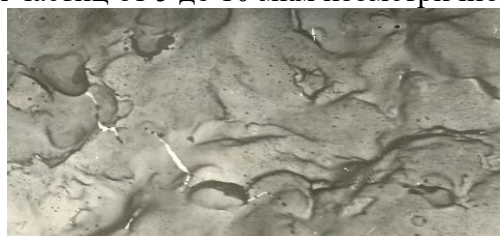


Рис. 2 – Форма и микроструктура горелой породы терриконика шахты «Абашевская» под сканирующим микроскопом (при увеличении 3000х)
Fig. 2 – The shape and microstructure of the burnt waste heap rock of the Abashevskaya mine under a scanning microscope (at a magnification of 3000x)

Дифференциально-термический анализ (рис.3) позволил не только уточнить минералогический состав, но и установить термическую инертность (полноту прошедшего самообжига), получить информацию о физико-химических свойствах связанных с особенностями кристаллизации, и позволяющих установить момент времени и температуру, при которой происходят наиболее значительные изменения в системе с выявлением

критических точек и условий их формирования. Полученные результаты позволили представить общую картину протекающих процессов, установить существующие закономерности и индивидуальные особенности изучаемого сырья.

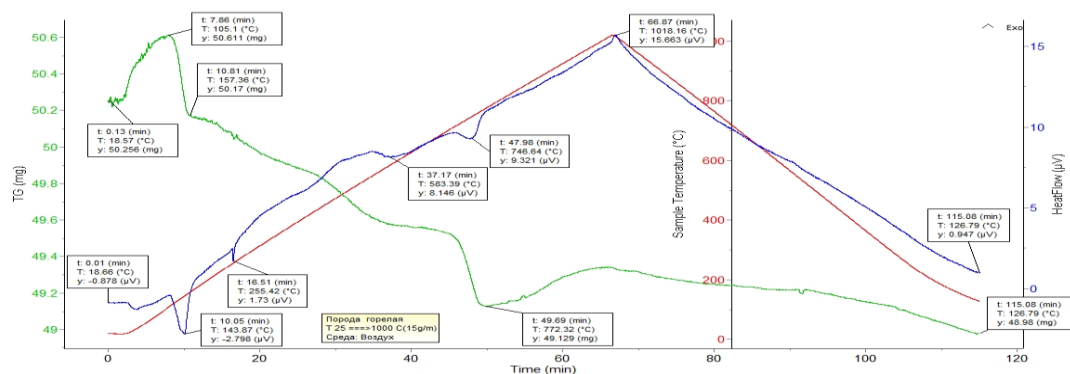


Рис. 3 – ДТА горелой породы
 Fig. 3 – DTA of burnt rock

На термограмме горелой породы видны несколько эндотермических эффектов. Первый при температуре от 110-120° С до 180°С соответствует удалению адсорбционной влаги из породы. Максимум испарения при 143°С.

Отсутствие термоэффектов, характерных для глинистых минералов свидетельствует о том, что обжиг горелой породы в терриконе происходил при температуре, превышающей 1000°С, а хорошо обожженные горелые породы являются термически инертными и не дают температурных эффектов. При температуре 255°С отмечается разложение тонкодисперсного гетита (FeOOH), содержащегося в виде включений в кристаллах кварца. Сам кварц в смесях с глинистыми минералами определить при помощи кривых нагревания, не удалось, так как все минералы этой группы имеют в области 500°–800° эндотермические эффекты, по своей величине значительно превосходящие.

В интервале температур 500-800°С идет разложение карбонатов сидерита и доломита, о чем свидетельствуют изменения на кривой изменения массы. Доломит $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ - двойная углекислая соль кальция и магния, один из главных минералов, слагающих карбонатные породы.

Кристаллическая структура железистой минеральной примеси - сидерит FeCO_3 среди карбонатов отличается высокой плотностью и твердостью. Подвергаясь термической диссоциации частично взаимодействует с глинистой частью породы. Полевые шпаты при нагревании в температурном интервале 20-1000° не дают никаких термических эффектов, поэтому для них дифференциальная кривая это прямая линия. Не выявлена термографическим анализом, и гидрослюда, так как в процессе выветривания, вероятно, произошло изменение ее кристаллической структуры.

Обсуждение результатов. Неизменной проблемой, препятствующей широкой утилизации горелых пород, остается отсутствие комплексного подхода к их переработке.

По результатам исследований и изучению опыта применения горелой породы в строительстве [22-26], обоснована необходимость более полного раскрытия ее сырьевого потенциала в технологиях производства бесклнкерных смесей общестроительного назначения с использованием в качестве сырья техногенных отходов горно-металлургического комплекса региона: горелых пород с терриконе шахты «Абашевская», сталеплавильных шлаков – энергонасыщенных крупнотоннажных отходов Западно-Сибирского металлургического комбината и шламов, полученных нейтрализацией известью электролитов отработанных кислотных аккумуляторов, аккумуляторных батарей промышленного транспорта предприятий. Шлаки предприятий Кузбасса основные (CaO 40–60%), с высоким содержанием оксидов алюминия (10–18%) и магния (8–12%). На физико-механические свойства и состав шлаков, оказывает влияние минерально-сырьевая база, представленная

железородными месторождениями Алтае-Саянской складчатой области и Ангаро-Илимского железорудного района (руды с магнезиальной пустой породой и повышенным содержанием Al_2O_3), известняками Салаира, доломитами Горной Шории и кварцитами Антоновского рудника. Известно, что сталеплавильные шлаки, являясь силикатными системами, после активации приобретают гидравлическую активность.

Шламовые отходы широко используются при производстве строительной продукции в качестве активаторов поверхности и наполнителей цементных систем, из-за разнообразного химического и минералогического состава, содержащего гипсовые, известково-гипсовые, гипсо-карбонатные, известково-гипсо-карбонатные композиции.

В соответствии с поставленной целью исследований разработаны составы строительных смесей (патенты РФ №№ 2377215, 2348814, 2642736) удовлетворяющие критериям их практической реализации:

- бесцементный мелкозернистый бетон [27] для изготовления элементов ограждения в конструкциях жилых домов и промобъектов в сборном и монолитном исполнении, по физико-механическим и деформативным характеристикам отвечающий всем требованиям СНиП и ГОСТов для мелкозернистых бетонов (табл. 5).

Таблица 5. Состав и свойства бесцементного мелкозернистого бетона
Table 5. Composition and properties of cement-free fine-grained concrete

Вещественный состав бетонной смеси, % по массе Material composition of concrete mix			Прочность при естественном твердении, 28 суток, МПа Strength during natural hardening, 28 days,		Средняя плотность кг/м ³ Average density kg/m ³	Подвижность (осадка конуса), см. Mobility (cone settlement)	Прочность сцепления с арматурой, МПа Adhesion strength to reinforcement, MPa	Модуль упругости, МПа Modulus of elasticity, MPa	Относительная усадка, мм/м Relative shrinkage	Относительная ползучесть, мм Relative creep	Сжимаемость, мм/м Compressibility, mm/m	Растяжимость, мм/м Stretchability, mm/m
Горелая порода Burnt rock	Шлак сталеплавильный (конверторный) Steelmaking slag (converter)	Шлам Sludge	При сжатии When compressed	При растяжении на изгиб When stretched under bending								
6	86	8	11,73	7,00	2000	14,40	2,30	9330	0,23	-	0,67	0,09

Исследованиями установлено, что бетонная смесь водостойкая, равномерность изменения объема выдерживает. Марка по удобоукладываемости ПЗ 10-15 см. В течение 2 лет бетон исследовался на основные физико-механические и деформативные свойства (табл. 6).

Таблица 6. Основные физико-механические и деформативные характеристики бетона
Table 6. Basic physical, mechanical and deformation characteristics of concrete

Характеристики бетона Characteristics of concrete	Периоды испытаний, дни Test periods, days		
	28	365	730
Прочность на сжатие (кубиковая), МПа Compressive strength (cubic), MPa	11,73	12,90	13,48
Призменная прочность, МПа Prismatic strength, MPa	9,22	10,80	11,32
Отношение призменной прочности к кубиковой Ratio of prismatic strength to cubic strength	0,87	0,83	0,84
Модуль упругости, МПа Modulus of elasticity	9330	12060	12600
Сжимаемость, мм/м Compressibility	0,67	0,74	0,71
Растяжимость, мм/м Stretchability	0,09	0,11	0,11
Относительная усадка, мм/м Relative shrinkage	0,23	0,44	0,46
Относительная ползучесть, мм/м	-	0,57	0,63

Было установлено, что разработанный бесцементный бетон в течение 2 лет наращивает свою прочность на сжатие и призменную прочность соответственно на 13 и 19%. Максимальное нарастание в первый год до 15% и за последующий период менее 5%. Модуль упругости увеличился на 23%, что не превышает требования СНиП 2.03.01-84* к мелкозернистым цементным бетонам. Усадка за 2-летний период составила 0,46 мм/м. В первые сутки она незначительна - 0,12 мм/м, далее до 28 дней находится в пределах 0,23 мм/м.

В возрасте от 28 дней до 180 продолжает увеличиваться (0,35 мм/м), а свыше 180 дней практически прекращается.

Опытно-производственное опробование и внедрение разработанной шлакобетонной смеси общестроительного назначения на Томь - Усинском заводе железобетонных изделий», Заводе крупнопанельного домостроения № 2 Новокузнецкого домостроительного комбината им. А.В. Косилова, Торгово-производственном доме Авангард и предприятиях строительной индустрии региона: ООО «СК Новокузнецк» и ООО «ТС Спецстрой» показало экономическую целесообразность и эффективность ее применения;

- бесцементная закладочная смесь [28, 29] для горно-геологических условий Кузбасса - мощных крутопадающих и наклонных месторождений (табл. 7) по основному показателю – пределу прочности на одноосное сжатие удовлетворяет требованиям, предъявляемым к твердеющим закладочным смесям.

Прочность разработанного закладочного материала, подвижность, сроки схватывания определялись согласно принятым стандартам. В результате испытаний определён класс по прочности - В7,5 (М 100 кгс/см²).

Таблица 7. Основные характеристики закладочного состава

Table 7. Main characteristics of the filling composition

Составы Compositions	Расход материалов, кг/м ³ Material consumption	Средняя плотность, кг/м ³ Average density	Подвижность смеси, см Mixture mobility, cm	Прочность при сжатии, МПа, в возрасте, сут. Compressive strength, MPa, at age, days.	
				28	60
Вяжущее: Astringent: Горелая порода 23%/ Burnt rock; Шлак сталеплавильный (мартеновский) 70%/ Steelmaking slag; Шлам 7% Sludge. Заполнитель: Aggregate: Шлак сталеплавильный (мартеновский) Steelmaking slag	1550 - 1600 230 - 240	1950	15,00	9,82	10,80

Разработанный состав рекомендован для промышленного использования при камерной и этажно-камерной системе разработки институтами ООО «ВостНИГРИ» и ОАО «Сибгипроруда»;

- разработанный бесцементный тампонажный материал [30] для повышения эффективности ремонтно-изоляционных работ в сложных горно-геологических условиях региона прошел апробацию и был рекомендован для промышленного использования руководителями региональных предприятий ООО «ИнТехПромИнжиниринг» и АО «Росгеология». Состав и основные физико-механические свойства представлены в табл. 8 и 9.

Таблица 8. Состав тампонажного материала

Table 8. Composition of the cementing material

Компоненты состава Composition components		Количество (% мас.) Quantity	Удельная поверхность, S _{уд} (плотность, ρ) Specific surface area, Ssp (density, ρ)
Горелая порода Burnt rock		10	S _{уд} = 340 м ² /кг
Шлак сталеплавильный Steelmaking slag	конверторный converter	48 - 50	
	электросталеплавильный electric steelmaking	33 - 35	
Шлам Sludge		остальное rest	ρ = 1,310 г/см ³

Было установлено, что разработанный тампонажный материал удовлетворяет основным требованиям ГОСТ 1581-96. Усадка и трещины при твердении отсутствуют.

Таблица 9. Результаты испытаний разработанного тампонажного материала
Table 9. Results of testing the developed plugging material

Показатели Indicators	Результаты испытаний Test results	Требования по ГОСТ 1581-96 GOST
Тонкость помола – удельная поверхность, м ² /кг Grinding fineness – specific surface area, m ² /kg	320	не менее 270
Отношение шлам-шихта Slurry-to-blend ratio	0,5	-
Плотность раствора, кг/м ³ Mortar density	1960	-
Плотность камня, кг/м ³ Stone density, kg/m ³	2000	-
Прочность при изгибе в возрасте 2 сут., МПа Bending strength at 2 days, MPa	2,79 - 3,98	не менее 2,7
Прочность при сжатии в возрасте 2 сут., МПа Compressive strength at 2 days, MPa	5,22 – 5,68	-
Водоотделение, мл Water separation, ml	< 1	не более 8,7
Время загустевания до консистенции 30 Вс, мин. Thickening time to 30 Vs consistency, min.	1200 - 1440	не менее 90

Вывод. В «Стратегии развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года» определены основные принципы, цели и задачи государственной политики на среднесрочную и долгосрочную перспективы в строительном секторе, а также эффективные механизмы достижения поставленных целей. В соответствии с одним из приоритетных направлений в инновационных технологиях производства строительных материалов, сформулированных в данном документе: «...производство малоклинкерных композиционных вяжущих смесей на базе использования металлургических шлаков, золошлаковых отходов тепловых электростанций, а также бесцементных вяжущих смесей и другие варианты вовлечения в производство строительных материалов в качестве сырья техногенных отходов», производство мелкозернистых бетонов, закладочных смесей и тампонажных растворов с использованием горелых пород и шлаковых отходов промышленных предприятий Кузбасса является актуальным.

Комплексный подход к переработке и утилизации горелых пород шахтных отвалов угольных регионов России может быть реализован путем проектирования комбинатов по производству бесклинкерных шлакобетонных смесей различного функционального назначения. Ликвидация промышленных полигонов многотоннажных вторичных минеральных продуктов - важнейшая на сегодняшний день задача для территорий, насыщенных объектами горно-металлургической инфраструктуры.

Библиографический список:

1. Шаповалов, В.В. Ресурсосберегающая технология утилизации породных отвалов горнодобывающих производств / В.В. Шаповалов, Д.А. Козырь // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2023. - Т. 334, № 4. - С. 175–184.
2. Верех-Белоусова, Е.И. Перспективы переработки породных отвалов угольных шахт Донбасса// Материалы пула научно-практических конференций. Керчь: КГМТУ. - 2022. – С. 360-363.
3. Коваленко, Л.И. Перспективы использования горелых пород шахтных отвалов / Л.И. Коваленко, Н.П. Омельченко // Проблеми екології. - 2009. - № 1-2. - С.16–19.
4. Майдукова, С.С. Экономическая целесообразность использования ресурсного потенциала минеральной составляющей отходов угольного производства / С.С. Майдукова // Економічний вісник. - 2013. - № 3. - С. 145–153.
5. Мнухин, А.Г. Породные отвалы – сырье будущего// Уголь Украины. - 2009. - № 5. - С. 28–32.
6. Глушнев, С.В. Использование отходов угольной промышленности в дорожном строительстве. / С.В. Глушнев - М.: ЦНИЭИУголь, 1983. - 218 с.
7. Книгина, Г.И. Строительные материалы из горелых пород. – М.: Стройиздат, 1966. – 208 с.
8. Рекитар, Я.А. Эффективность использования промышленных отходов в строительстве. / Я.А Рекитар. – М.: Стройиздат, 1978. – 172 с.
9. Кузьмин, М.П. Горелая порода угольных месторождений в производстве изделий из бетона / М.П. Кузьмин, Л.М. Ларионов, В.В. Кондратьев, М.Ю. Кузьмина, В.Г. Григорьев, А.С. Кузьмина // Инженерно-строительный журнал. - 2017. - № 8(76). - С. 169–180. DOI: 10.18720/МСЕ.76.15.
10. Гамалий, Е.Н. Горелые породы как активная минеральная добавка в бетон / Е.Н. Гамалий // Вестник ЮУрГУ, Строительство и архитектура. - 2008. - № 25. - С. 22–27.

11. Буравчук, Н.И. Использование материалов из горелых пород шахтных отвалов в дорожном строительстве / Н.И. Буравчук, О.В. Гурьянова, Г.Н. Пак // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. - 2014. - № 1. - С.75-80.
12. Вавренюк, С.В. Использование горелых пород в производстве изделий для ограждающих конструкций / С.В. Вавренюк, Г.А. Кораблева, О.В. Старикова // Жилищное строительство. - 2013. - №12. - С 37-38.
13. Сапелкина, Т.В. Получение силикатного стенового материала на основе вскрышной горелой породы угледобычи на примере месторождений республики Тыва / Т.В. Сапелкина, Б.К. Кара-сал, А.Н. Стрельников // Успехи современного естествознания. - 2019. - № 8. - С. 67-72.
14. Жакина, А.Х. Композиционные материалы на основе горелой породы в сочетании с угольным и полимерным сырьем в условиях волнового воздействия / А.Х. Жакина, О.В. Арнт, Е.П. Василец // Наука настоящего и будущего. - 2019. - Т.3. - С.39-42.
15. Зимакова, Г.А. Активация металлургического отвального шлака / В.А. Солонина, С.В. Илясова, М.А. Ашуруп // Инновации и инвестиции. - 2019. - № 10. - С. 280-284.
16. Fedorov, P. Alkali-Activated Binder Based on Cupola Dust of Mineral Wool Production with Mechanical Activation / P. Fedorov, D. Sinitsin // *Buildings*. - 2022. No. 12(10), P. 1565. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12101565>.
17. Лапшин, О.В. Роль смешения и диспергирования в механохимическом синтезе (обзор) / О.В. Лапшин, Е.В. Болдырева, В.В. Болдырев // Журнал неорганической химии. - 2021. - Т. 6, № 3. - С. 402–424. DOI: 10.31857/S0044457X21030119.
18. Абрамов, М.А. Механохимическая технология эффективного использования вторичного техногенного сырья / М.А. Абрамов, Е.Г. Степанов, Д.В. Качалов, А.О. Мурашов // Вестник РГГА имени П.А. Соловьева. - 2021. - № 1 (56) - С. 84-89.
19. Голик, В.И. Механохимическая активация хвостов обогащения для использования в качестве компонентов твердеющих закладочных смесей / В.И. Голик, И.А. Алексеев // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2023. - № 5-1. - С. 5–16.
20. Голик, В.И. Комбинированные технологии активации минерального сырья / В.И. Голик, А.В. Титова // Горная промышленность. - 2021. - № 5. - С.100–105. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-5-100-105.
21. Сучков, В.П. Механохимическая активация природного и техногенного сырья при производстве высокопрочного гипса / В.П. Сучков, А.В. Веселов // Технологии бетонов. - 2021. - № 6 (179). - С. 71-77.
22. Endzhievskaya, I.G. Wall Materials on the Base of Burned Rocks / I.G. Endzhievskaya, N.G. Vasilovsky, G.P. Baranova, I.S.Voroshilov // *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*, - 2016, - Vol. 9, No. 4. - P. 563-571.
23. Буравчук, Н.И. Материалы из горелых пород для бетонной шахтной крепи / Н.И. Буравчук, О.В. Гурьянова // Инноватика и экспертиза. - 2022. - Вып. 1 (33). - С. 106-114.
24. Абдрахимова Е.С. Использование отходов топливно-энергетического комплекса – горелых пород и отходов обогащения хромитовых руд в производстве пористых заполнителей на основе жидкостекольной композиции // Уголь. 2019. № 7. С. 67–69.
25. Буравчук, Н.И. Использование техногенного сырья в технологии керамического кирпича / Н.И. Буравчук, О.В. Гурьянова // Инноватика и экспертиза. - 2020. - Вып. 2 (30). - С.160-169.
26. Buravchuk, Nina I. Use of technogenic raw materials in ceramic technology *Open Ceramics* / Nina I. Buravchuk, Olga V. Guryanova, Ivan A. Parinov // *Open Ceramics*. Vol. 18, June 2024,. 100578.
27. Бетонная смесь: пат. Рос. Федерация / Е.В. Корнеева, С.И. Павленко - № 2377215; заявл. 23.12.08; опубл. 27.12.09. - 4 с.
28. Состав закладочной смеси: пат. Рос. Федерация Е.В. Корнеева, С.И. Павленко - № 2348814; заявл. 03.09.2007; опубл. 10.03.2009. - 3 с.
29. Способ приготовления бесцементной закладочной смеси: пат. Рос. Федерация Е.В. Корнеева - № 2792863; заявл. 15.03.22; опубл. 28.03.23. - 3 с
30. Тампонажный раствор: пат. Рос. Федерация Е.В Корнеева - заявл. 28.02.17; опубл. 25.01.18. - 2 с.

References:

1. Shapovalov V.V., Kozyr D.A. Resource-saving technology for recycling rock dumps of mining industries. *Proceedings of the Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering*, 2023;334:(4):175–184.
2. Verzh-Belousova E.I. Prospects for processing rock dumps of Donbass coal mines // *Materials of a pool of scientific and practical conferences / Kerch: KGMTU*, 2022:360-363.
3. Kovalenko L.I., Omelchenko, N.P. Prospects for the use of burned rocks mine dumps. *Problemiye`kologii = Problemiyekologii*, 2009; 1-2:16-19.
4. Maydukova S.S. The economic feasibility of the use of the resource potential of the mineral component of coal waste. *E`konomichnijvisnik = Ekonomichniyvisnik.*, 2013;3:145–153.
5. Mnukhin A.G. Dumps – the raw material of the future. *Ugol` Ukrainy` = Coal of Ukraine*, 2009;5:28–32.
6. Glushnev S.V. Use of coal industry waste in road construction. *Moscow: TsNIEI Ugol*, 1983;218.
7. Knigin G.I. Construction materials from burnt rocks. *Moscow: Stroyizdat*, 1966;297 p.
8. Rekhtar Ya.A. Efficiency of industrial waste use in construction. *Moscow: Stroyizdat*, 1978;172 p.

9. Kuzmin M.P., Larionov L.M., Kondratyev V.V., Kuzmina M. Yu., Grigoriev V.G., Kuzmina A.S. Burnt rock of coal deposits in the production of concrete products. *Engineering and construction journal*, 2017; 8(76):169–180. DOI: 10.18720/MCE.76.15.
10. Gamaliy E.N. Burned rocks as an active mineral additive in concrete. *Vestnik YuUrGU, Stroitel'stvo i arkhitektura = Vestnik of SUSU, Construction and architecture*, 2008; 25:22–27.
11. Buravchuk N.I., Guryanova O.V., Pak G.N. Use of materials from burnt rocks of mine dumps in road construction. *News of universities. North Caucasian region. Technical sciences*, 2014;1:75-80.
12. Vavrenyuk S.V., Korableva G.A., Starikova O.V. Use of burnt rocks in the production of products for enclosing structures. *Housing construction*, 2013;12:37-38.
13. Sapelkina T.V., Kara-sal B.K., Strelnikov A.N. Production of silicate wall material based on overburden burnt rock from coal mining using the example of deposits in the Republic of Tyva. *Successes in modern natural science*, 2019; 8: 67-72.
14. Zhakina A.Kh., Arnt O.V., Vasilets E.P. Composite materials based on burnt rock in combination with coal and polymer raw materials under wave action. *Science of the present and future*, 2019;3:39-42.
15. Zimakova G.A., Solonina V.A., Ilyasova S.V., Ashurov M.A. Activation of metallurgical dump slag. *Innovation and Investment*, 2019;10: 280-284.
16. Fedorov P., Sinitsin D. Alkali-Activated Binder Based on Cupola Dust of Mineral Wool Production with Mechanical Activation. *Buildings*, 2022;12(10):1565. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12101565>.
17. Lapshin O.V., Boldyreva E.V., Boldyrev V.V. Role of mixing and dispersion in mechanochemical synthesis (overview). *Journal of Inorganic Chemistry*, 2021;6(3):402–424. DOI: 10.31857/S0044457X21030119.
18. Abramov M.A., Stepanov E.G., Kachalov D.V., Murashov A.O. Mechanochemical technology of efficient use of secondary technogenic raw materials. *Bulletin of the RGAT named after P.A. Solov'yov*, 2021;(56): 84-89.
19. Golik V.I., Alekseev I.A. Mechanochemical activation of enrichment tailings for use as components of hardening filling mixtures. *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2023;5-1:5–16.
20. Golik V.I., Titova A.V. Combined technologies for activation of mineral raw materials. *Mining industry*, 2021;5:100–105. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-5-100-105.
21. Suchkov V.P., Veselov A.V. Mechanochemical activation of natural and man-made raw materials in the production of high-strength gypsum. *Concrete technologies*, 2021; 6 (179):71-77.
22. Endzhievskaya I.G., Vasilovsky N.G., Baranova G.P., Voroshilov I.S. Wall Materials on the Base of Burned Rocks. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*, 2016;9(4):563–571.
23. Buravchuk N.I., Guryanova O.V. Materials from burnt rocks for concrete mine support. *Innovation and expertise*, 2022;1(33):106-114.
24. Abdrakhimova E.S. Use of fuel and energy complex wastes - burnt rocks and chromite ore enrichment wastes in production of porous aggregates based on liquid-glass composition. *Coal*, 2019;7:67–69.
25. Buravchuk N.I., Guryanova O.V. Use of technogenic raw materials in ceramic brick technology. *Innovation and expertise*, 2020;2 (30):160-169.
26. Nina I. Buravchuk, Olga V. Guryanova, Ivan A. Parinov Use of technogenic raw materials in ceramic technology *Open Ceramics*. 18, June 2024;18:100578.
27. Korneeva E.V., Pavlenko S.I. Concrete mixture. Patent Rossiiskaia Federatsiia. 2009; 2377215.
28. Composition of the filling mixture: Russian Patent E.V. Korneeva, S.I. Pavlenko - No. 2348814; declared 03.09.2007; published 10.03.2009. - 3 p.
29. Method for preparing a cement-free filling mixture: Russian Patent E.V. Korneeva - No. 2792863; declared 15.03.22; published 28.03.23. - 3 p.
30. Cementing slurry: Russian Patent E.V. Korneeva - declared 28.02.17; published 25.01.18. - 2 p.

Сведения об авторах:

Корнеева Елена Викторовна, кандидат технических наук, доцент, доцент, кафедра «Инженерных конструкций, строительных технологий и материалов»; hellen-box-8@yandex.ru.

Корнеев Виктор Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент, кафедра «Геотехнологии»; korneev_va@list.ru

Information about authors:

Elena V. Korneeva, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Engineering Structures, Construction Technologies and Materials; hellen-box-8@yandex.ru.

Victor A. Korneev, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Geotechnology; korneev_va@list.ru

Конфликт интересов / Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 27.09.2025.

Одобрена после рецензирования/Reviced 28.11.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 28.01.2026.

Прочностные свойства обработанных неорганическим вяжущим щебеночно-песчаных смесей с использованием ускорителей твердения комплексного действия

Е.А. Лукаш, В.А. Гричаников, В.Г. Рогуленко, Е.В. Донцова

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, Россия

Резюме. Цель. Целью работы является исследование влияния добавок – ускорителей твердения «Fastkick 111» и «Centrament Rapid 151» на прочностные свойства ЦПЦС. **Метод.** Для комплексного анализа прочностных свойств ЦПЦС с использованием ускорителей набора прочности разработаны и испытаны цилиндрические образцы в соответствии с требованиями ГОСТ Р 70455-2022 «Смеси щебеночно-гравийно-песчаные, обработанные неорганическими вяжущими. Общие технические условия». **Результат.** Комплексное исследование прочностных характеристик образцов ЦПЦС в зависимости от дозировки цемента и ускорителей твердения комплексного действия позволило разработать оптимизированные рецептуры, обеспечивающие максимальную эксплуатационную надежность материала. Экспериментально установлено, что повышение содержания цемента в составе смесей приводит к пропорциональному увеличению его прочностных показателей. Максимальная прочность достигается при введении 4% цемента и 2,5% «Fastkick 111» в состав смеси. В 5-ти суточном возрасте наблюдается достижение марки по прочности М60, в 7-ми суточном – М70, в 28-ми суточном – М80. **Вывод.** Использование добавок при укреплении щебеночно-песчаных смесей способствует приросту прочности образцов на растяжение при раскалывании, что свидетельствует об улучшении трещиностойкости. Добавка «Fastkick 111» позволяет ускорить процесс укладки верхних слоев дорожной одежды, сокращая время ожидания до трех дней после уплотнения смеси; способствует снижению расхода цемента на 20% без ухудшения прочностных характеристик.

Ключевые слова: щебеночно-песчаная смесь, цемент, добавка, набор прочности, основание дорожной одежды

Для цитирования: Е.А. Лукаш, В.А. Гричаников, В.Г. Рогуленко, Е.В. Донцова. Прочностные свойства обработанных неорганическим вяжущим щебеночно-песчаных смесей с использованием ускорителей твердения комплексного действия. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(1):224-232. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-224-232.

Strength properties of crushed stone-sand mixtures treated with inorganic binders using complex hardening accelerators

E.A. Lukash, V.A. Grichanikov, V.G. Rogulenko, E.V. Dontsova

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
46 Kostyukova St., Belgorod 308012, Russia

Abstract. Objective. The aim of this study is to investigate the effect of two additives – the hardening accelerators «Fastkick 111» and «Centrament Rapid 151» on the strength properties of CSM. **Method.** To analyze the strength properties of crushed stone-gravel-sand mixtures using strength accelerators, cylindrical samples were developed and tested in accordance with the requirements of GOST R 70455-2022 "Crushed stone-gravel-sand mixtures treated with inorganic binders. General specifications". **Result.** A comprehensive study of the characteristics of CPCS samples depending on the dosage of cement and complex hardening accelerators made it possible to develop optimized formulations that ensure maximum material reliability. It has been

experimentally established that increasing the cement content in the composition of mixtures leads to a proportional increase in strength indicators. Maximum strength is achieved by adding 4% cement and 2.5% Fastkick 111 to the mixture. At 5 days, the mixture reaches M60 strength, at 7 days – M70, and at 28 days – M80. **Conclusion.** The use of additives in strengthening crushed stone-sand mixtures increases the tensile strength of samples, demonstrating improved crack resistance. The "Fastkick 111" additive accelerates the process of laying the top layers of the pavement, reducing the waiting time to three days after compaction; it also helps reduce cement consumption by 20% without compromising strength properties.

Keywords: crushed stone-sand mixture, cement, additive, strength gain, road base

For citation: E.A. Lukash, V.A. Grichanikov, V.G. Rogulenko, E.V. Dontsova. Strength properties of crushed stone-sand mixtures treated with inorganic binders using complex hardening accelerators. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):224-232. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-224-232.

Введение. В России наблюдается активное развитие дорожной инфраструктуры. В связи с этим возрастает значимость технологий, основанных на передовых технических решениях, которые позволяют эффективно использовать местные укрепленные грунты и обработанные материалы для формирования дорожных покрытий. Эти инновационные методы способствуют решению ключевых задач, таких как улучшение транспортной доступности, повышение экологической устойчивости и стимулирование социально-экономического развития регионов [1]. Для оптимизации реологических характеристик верхнего слоя дорожного покрытия с целью повышения его общей упругости и минимизации накопления остаточных деформаций рекомендуется внедрение конструктивных слоев оснований, изготовленных из щебеночно-песчаных смесей, модифицированных различными вяжущими материалами. Такой подход позволяет значительно улучшить прочностные характеристики дорожной конструкции, повысить ее устойчивость к динамическим и эксплуатационным воздействиям, а также обеспечить долговечность и надежность дорожного покрытия в условиях интенсивной транспортной нагрузки [2].

Укрепление – комплекс мер, направленных на обработку смеси щебня, гравия и песка с применением неорганических вяжущих, что повышает их физико-механические характеристики [3]. Заметные успехи в указанной области были достигнуты благодаря применению минеральных вяжущих веществ [4-11]. Однако использование их в исходном состоянии связано с серьезными недостатками, снижающими эффективность обработки грунтовых оснований. Одним из ключевых факторов является невысокая устойчивость к образованию трещин в укрепленных материалах, особенно при высоких показателях прочности. Данная проблема обусловлена низкой деформационной способностью связующих компонентов, ограничивающей их способность адаптироваться к объемным изменениям грунта под влиянием разных типов нагрузки. Плохая водоустойчивость минеральных вяжущих вынуждает увеличивать объемы используемых добавок для достижения нужных технических показателей, что ведет к существенному удорожанию строительства. В отдельных ситуациях, особенно при обработке специфичных грунтов с особыми инженерно-геологическими характеристиками, достижение необходимой устойчивости к воздействию низких температур представляет собой сложную проблему, требующую инновационного подхода и комплексных мер.

Для ее решения необходимо применять комплексный подход, включающий инновационные технологические решения и методы, направленные на повышение устойчивости укрепленных материалов к циклическим температурным изменениям [12]. В ходе гидратации и последующей кристаллизации цементного вяжущего материала осуществляются комплексные физико-химические трансформации, которые оказывают существенное влияние на усадочные процессы в щебеночно-песчано-цементных смесях (ЩПЦС).

Постановка задачи. Существуют два ключевых этапа формирования цементных композиций, сопровождающихся химическими реакциями воды с минеральными

составляющими цемента. На начальном этапе молекулы воды взаимодействуют с минералами цемента, образуя новые гидратные соединения. Эти соединения имеют меньший объем по сравнению с первоначальной массой реагентов. Вследствие этого возникает явление усадки, приводящее к образованию внутренних напряжений внутри материала.

По мере дальнейшего протекания процесса гидратации формируются кристаллы новых фазовых соединений. Их рост способствует уменьшению интенсивности усадочных явлений, поскольку структура становится более стабильной и устойчивой [13]. Процессы взаимодействия воды с цементом играют ключевую роль в формировании качественных характеристик бетона и прочих композитных материалов на его основе. Понимание особенностей каждого этапа позволяет оптимизировать состав смесей и технологию производства, обеспечивая высокую прочность и устойчивость сооружений.

Методы исследования. Выделяют несколько ключевых методов для снижения вероятности появления начальных усадочных трещин в ЩПЦС: оптимизация состава, использование специальных технологических приемов и применение модифицирующих добавок. Целью оптимизации состава является достижение оптимального баланса прочности, пластичности и устойчивости к образованию трещин. Достигается за счет подбора правильных соотношений компонентов и обеспечения достаточного водоцементного отношения для предотвращения чрезмерной потери влаги и образования дефектов. Специальные технологические приемы предполагают увлажнение среды при тепловой обработке с последующим регулярным увлажнением поверхности. Поддержание влажности окружающей среды предотвращает быстрое испарение влаги из поверхностного слоя смеси, уменьшая риск возникновения трещин. Нанесение тонкого слоя воды или водно-дисперсных растворов создает защитный барьер, предотвращающий потерю влаги, что обеспечивает равномерное протекание процесса усадки и нивелирует напряжения, возникающие в результате данного явления.

Увлажнение среды является эффективным методом оптимизации термообработки, способствующим повышению качества конечного продукта и снижению вероятности дефектов. Введение пластификаторов, воздухововлекающих аддитивов и гидрофобизаторов в состав бетонной смеси оказывает значительное влияние на ее реологические характеристики, существенно повышая пластичность и снижая коэффициент усадки. Компоненты играют ключевую роль в оптимизации процессов твердения, обеспечивая более точный контроль за параметрами кристаллизации цементного камня. Данный подход позволяет минимизировать образование усадочных трещин, что, в свою очередь, способствует повышению долговечности и эксплуатационных характеристик бетонных конструкций. При формировании многослойных дорожных оснований, состоящих из щебеночно-песчаных смесей, модифицированных цементом, требуется обязательное соблюдение технологического перерыва. Временной интервал является критически важным для достижения требуемой марки прочности материала, что обеспечивает долговечность и надежность дорожного покрытия. Его реализация сопряжена с существенными временными и финансовыми затратами, что значительно увеличивает общие сроки и стоимость строительства. Исследования, представленные в работах [14-18], подтверждают высокую эффективность предложенного подхода к минимизации усадочных трещин, что делает его актуальным и перспективным для практического применения в современном строительстве. В связи с этим возникла необходимость изучения воздействия добавок «Fastkick 111» и «Centrament Rapid 151» на физико-механические свойства ЩПЦС. Основные характеристики добавок представлены в табл. 1. Данные добавки играют ключевую роль в формировании кристаллизационных и коагуляционных связей, обеспечивая структурную прочность и долговечность композиционных материалов. Их использование в сочетании с минеральными вяжущими веществами представляет собой оптимальное решение для достижения высоких физико-механических характеристик конечного продукта.

Таблица 1. Характеристики стабилизирующих добавок
Table 1. Characteristics of stabilizing additives

Описание Description	Наименование добавки Additive name	
	Fastkick 111	Centrament Rapid 151
Особенности применения Features of application	Является высокоэффективным ускорителем твердения бетона в раннем возрасте/ Highly effective concrete hardening accelerator. Повышает раннюю прочность бетона, твердеющего в естественных условиях и условиях ТВО/Increases early strength of concrete. Позволяет сократить продолжительность цикла, снизить максимальную температуру либо полностью отказаться от проведения ТВО/ Allows to reduce cycle time. Увеличивает связность бетонных смесей Increases the cohesion of concrete mixtures. Обладает суперпластифицирующим и суперводоредуцирующим эффектом It has a superplasticizing and superwater-reducing effect	Сильный ускоряющий эффект при любых режимах ТВО и ТО/Strong accelerating effect in any heat and power supply modes. Добавка позволяет стабилизировать бетонные смеси при применении некачественных заполнителей (оптимально работает на любых расходах цемента от 100 кг до 550 кг)/The additive helps stabilize concrete mixtures. Не содержит компонентов (хлора, аммиака), вызывающих коррозию арматуры/Does not contain components (chlorine, ammonia) that cause corrosion of reinforcement. Высокая эффективность при низком расходе цемента/High efficiency with low cement consumption. Не снижает раннюю прочность/Does not reduce early strength. Не увеличивает водопотребность/Does not increase water demand.
Внешний вид Appearance	Жидкость коричневого цвета Brown liquid	
Дозировка % от массы цемента Dosage	2,0 – 4,0	0,5 – 2,5
Транспортировка и хранение Transportation and storage	В оригинальной упаковке. Не допускается замораживание In original packaging. Do not freeze.	

Внедрение таких модификаторов способствует значительному снижению расхода вяжущего компонента, ускорению кинетики твердения и минимизации риска возникновения усадочных дефектов. Гидратационное твердение минеральных вяжущих материалов представляет собой сложный физико-химический процесс, связанный с последовательными стадиями растворения, химического взаимодействия и кристаллизации. Процесс начинается с контакта сухих вяжущих веществ с водой, вследствие которого компоненты вяжущего (например, цемент) переходят в состояние водных растворов. Образующиеся растворы содержат активные ингредиенты, вступающие в дальнейшие химические реакции.

Следующая важная стадия – диффузионное проникновение молекул воды внутрь кристаллической решетки компонентов вяжущего. Это запускает цепочку химических преобразований, результатом которых становится образование гидратированных соединений. Новообразованные гидраты формируют первоначальные аморфные структуры, постепенно увеличивающие свою упорядоченность и пространственное распределение. По мере развития процесса нарастают межфазные контакты, укрепляются молекулярные связи, что способствует созданию прочной сетчатой структуры. Ключевым этапом является зарождение и рост кристаллов гидратов. Они увеличивают плотность сформировавшейся структуры, уменьшают количество пустот и повышают общую прочность системы. Конечный продукт гидратации представляет собой сложную систему, характеризующуюся наличием прочно сцепленных кристаллических образований, создающих жесткую конструкцию. Гидратационная реакция протекает поэтапно, начиная с проникновения воды в структуру вяжущего вещества и заканчивая формированием стабильных и прочных кристаллических фаз. В результате образуется прочный строительный материал, обладающий высокими эксплуатационными характеристиками и длительным сроком службы [19]. Гидратационное твердение цементных составов играет ключевую роль в строительной отрасли, поскольку определяет конечную прочность и долговечность возводимых сооружений. Применение специализированных добавок, таких как соли кальция, заметно ускоряет этот процесс, улучшая характеристики набора прочности материалами. Механизм влияния добавок основан на двух ключевых аспектах – интенсификация растворения клинкерных минералов и формирование двойных солей. Компоненты клинкера, такие как алит и белит, вступают в реакцию с водой, образуя гель-фазы, регулируя скорость гидратации. Кальцийсодержащие

добавки активизируют процессы растворения и взаимодействия клинкерных частиц, что ускоряет начало гидратации. Если концентрация добавок превышает оптимальное значение, они начинают реагировать с гидроксидом кальция, создавая устойчивые комплексы. Это повышает растворимость основных минералов клинкера, ускоряя темп гидратации [20].

Обсуждение результатов. В работе использовался нормальнотвердеющий портландцемент марки ЦЕМ I 42,5 Н производства АО «ЦЕМРОС». В рамках исследования были разработаны и оптимизированы рецептуры щебеночно-песчаных композиций, которые представлены в табл.2. Для проведения исследований изготовлены цилиндрические образцы диаметром 100 мм и высотой 120 мм, которые после завершения формования набирали прочность в условиях естественного температурно-влажностного режима.

Таблица 2. Составы щебеночно-песчано-цементных смесей

Table 2. Compositions of crushed stone-sand-cement mixtures

№ п/п	Состав смесей, % Composition of mixtures				Содержание добавок от цемента, % Content of cement additives	
	Щебень Crushed stone	Песок Sand	Цемент Cement	Вода Water	Fastkick 111	Centrament Rapid 151
1	60	36	4	2,5		
2	60	36	4	2,5	2,0 – 4,0	
3	60	36	4	2,5		0,5 – 2,5

В табл. 3 и 4 приведены результаты испытаний щебеночно-песчаных смесей, укрепленных цементом. В смесях варьировалась концентрация добавок. Данные представлены для двух временных периодов: 7 и 28 суток. Исследование данных показывает, что при введении добавки «Fastkick 111» в дозировке 2,5% образцы из щебеночно-песчаных смесей, укрепленных 4% цемента, достигают прочности, соответствующей марке М70 ($R_{сж} = 7,16$ МПа), что составляет 88% от проектной прочности через 28 дней твердения.

Таблица 3. Прочность образцов в возрасте 7 и 28 суток при различной концентрации добавки Fastkick 111

Table 3. Strength of samples at 7 and 28 days of age with different concentrations of Fastkick 111 additive

Концентрация добавки в бетонной смеси, % от массы цемента Concentration of additive in concrete mix, % of cement mass	Прочность при сжатии на 7 сутки, МПа Compressive strength at 7 days, MPa	Прочность при сжатии на 28 сутки, МПа Compressive strength at 28 days, MPa	Прочность при сжатии на 7 сутки, % от 28-ми суточной Compressive strength at 7 days, % of 28 days
0	4,31	6,32	68,2
2,0	4,64	7,84	59,1
2,5	7,16	8,10	88,4
3,0	6,81	7,32	93,0
3,5	6,67	8,29	80,5
4,0	6,11	6,68	91,5

Таблица 4. Прочность образцов в возрасте 7 и 28 суток при различной концентрации добавки Centrament Rapid 151

Table 4. Strength of samples at 7 and 28 days of age with different concentrations of Centrament Rapid 151 additive

Концентрация добавки в бетонной смеси, % от массы цемента Concentration of additive in concrete mix, % of cement mass	Прочность при сжатии на 7 сутки, МПа Compressive strength at 7 days, MPa	Прочность при сжатии на 28 сутки, МПа Compressive strength at 28 days, MPa	Прочность при сжатии на 7 сутки, % от 28-ми суточной Compressive strength at 7 days, % of 28 days
0	4,31	6,32	68,2
0,5	4,28	6,48	66,1
1,0	4,46	6,79	65,7
1,5	4,59	6,92	66,3
2,0	4,63	7,06	65,6
2,5	4,47	6,83	65,4

Добавка «Centrament Rapid 151» не обеспечивает значительного повышения прочности бетона. При концентрации 2% она увеличивает прочность лишь до 4,63 МПа через 7 дней после твердения. Дальнейшие исследования проводились с ускорителем

набора прочности «Fastkick 111» в количестве 2,5% от массы цемента. Результаты представлены в табл. 5. Анализ данных показывает, что образцы щебеночно-песчаных смесей, обработанные 4% цемента и выдержанные в течение 3 суток, соответствуют марке прочности М20. Это подтверждается значениями предела прочности при сжатии ($R_{сж} \geq 2,0$ МПа) и предела прочности на растяжение при раскалывании ($R_{раст} \geq 0,3$ МПа).

Таблица 5. Прочность образцов с добавкой Fastkick 111
Table 5. Strength of samples with the addition of Fastkick 111

Наименование смеси Name of the mixture	Прочность, МПа, в зависимости от времени твердения образцов Strength, depending on the curing time of samples					
	сжатие $R_{сж}$ на растяжение при раскалывании $R_{раст}$			compression $R_{compression}$ tensile strength during splitting $R_{stretch}$		
	1 сутки	2 суток	3 суток	5 суток	7 суток	28 суток
ЩПС+4% цемента	0,97 0,07	1,79 0,22	3,09 0,46	3,74 0,61	4,31 0,81	6,32 1,22
ЩПС+4% цемента+ 2,5% Fastkick111	2,19 0,31	3,88 0,51	5,54 0,78	6,47 1,15	7,16 1,22	8,10 1,63

Через 7 суток наблюдается значительное улучшение характеристик: образцы достигают марки М40 с пределом прочности при сжатии не менее 4,0 МПа и пределом прочности на растяжение при раскалывании не менее 0,6 МПа. По истечении 28 суток прочность возрастает до марки М60, с пределом прочности при сжатии не менее 6,0 МПа и пределом прочности на растяжение при раскалывании не менее 0,9 МПа. Введение добавки «Fastkick 111» в состав композиционного материала приводит к значительному увеличению предела прочности на сжатие на 28%, что свидетельствует о существенном повышении его механических характеристик. Параллельно наблюдается рост предела прочности на растяжение при раскалывании на 33%, что указывает на повышение деформативной способности материала. Эффект может быть объяснен улучшением микроструктуры материала, что подтверждается теоретическими расчетами и экспериментальными данными. Увеличение деформативной способности материала имеет важное практическое значение, поскольку снижает вероятность образования усадочных трещин, которые могут существенно ухудшить эксплуатационные свойства материала. Применение стабилизатора «Fastkick 111» способствует улучшению механических характеристик материала, что подтверждается комплексным анализом данных, включающим экспериментальные исследования и теоретические модели.

Результаты проведенных испытаний визуализированы посредством построения диаграмм изменения предела прочности на сжатие и предела прочности на растяжение при раскалывании образцов, изготовленных из ЩПС, в зависимости от динамики набора прочности. Диаграммы представлены на рис. 1, 2 и позволяют оценить эффективность модифицирующей добавки и цемента в контексте повышения механических свойств материала. Через 3-е суток прочность материала с использованием добавки «Fastkick 111» увеличивается и составляет от марочной 87% - при сжатии и 64% - на растяжение при раскалывании.

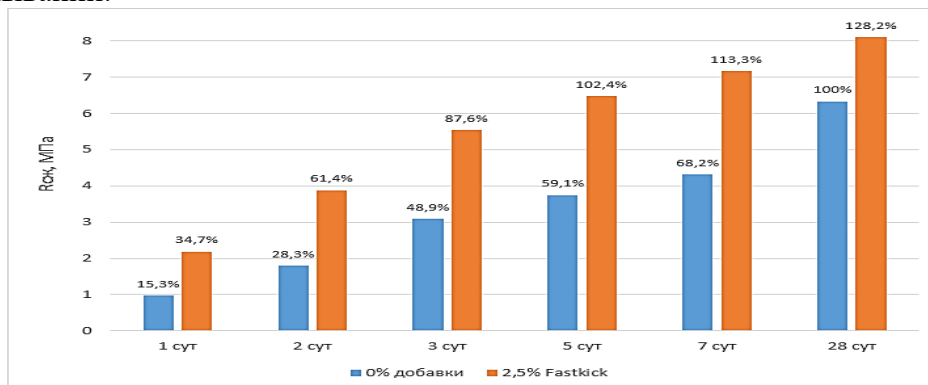


Рис. 1 – Изменение предела прочности при сжатии
Fig. 1 – Change in compressive strength

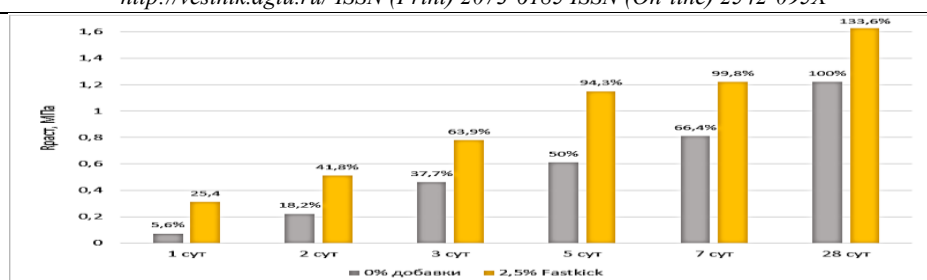


Рис. 2 – Изменение предела прочности на растяжение при раскалывании
Fig. 2 – Change in tensile strength at splitting

Результаты свидетельствуют о возможном сокращении технологического перерыва и продолжении укладки вышележащих слоев дорожной одежды. В 5-ти суточном возрасте наблюдается достижение марки по прочности М60, в 7-ми суточном – М70, в 28-ми суточном – М80. Комплексные исследования показывают, что модификатор играет ключевую роль в повышении прочности образцов. Это достигается благодаря активному взаимодействию модификатора с составляющими цементной смеси, которое стимулирует быстрое образование первичной структуры, включающей двойные соли, гидраты и гидроксисоли. Впоследствии эта структура дополнительно укрепляется за счет формирования слоя гидросиликатов кальция, что значительно усиливает механические свойства готового изделия. Благодаря ускорению процесса кристаллизации силикатных составляющих цементного камня на поверхности матриц, формируется плотная и равномерная внутренняя структура с улучшенным сцеплением наполнителя и связующего вещества. Итогом комплексного воздействия является существенное увеличение прочностных характеристик материала, что подтверждено лабораторными испытаниями.

Вывод. Анализ физико-механических параметров укрепленных портландцементом щебеночно-песчаных смесей с применением добавок «Fastkick 111» и «Centrament Rapid 151» демонстрирует полное соответствие установленным требованиям ГОСТ Р 70455-2022. Применение указанных добавок при укреплении щебеночно-песчаной смеси позволяет значительно уменьшить усадочные деформации. Это существенно повышает надежность и долговечность дорожного покрытия, снижает риск преждевременного разрушения и увеличивает интервал между ремонтами.

В ходе сравнительного анализа эффективности добавок по совокупности регламентированных физико-механических характеристик укрепленного материала, с учетом оптимального соотношения компонентов, был выявлен наиболее результативный состав, включающий 4% цемента и 2,5% «Fastkick 111». Данный вывод подтверждается комплексным подходом к оценке стабилизирующих свойств, что позволяет сделать обоснованное заключение о превосходстве указанного состава над альтернативными вариантами.

Добавка «Fastkick 111» позволяет ускорить процесс укладки верхних слоев дорожной одежды, сокращая время ожидания до трех дней после уплотнения смеси; способствует снижению расхода цемента на 20% без ухудшения прочностных характеристик.

Библиографический список:

1. Лукаш Е.А., Сушков Г.Р. Исследование влияния стабилизирующих добавок на физико-механические характеристики укрепленных портландцементом щебеночно-песчаных смесей // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2025. № 3 (173). С. 87-94. DOI: 10.71536/vd.2025.3c173.9.
2. Слободчикова Н.А., Ключев С.В., Плюта К.В. Зависимость модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, от прочности на сжатие // Вестник СиБАДИ. 2024. Т. 21, № 5. С. 786-800. DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-5-786-800.
3. Ядыкина В.В., Лукаш Е.А., Кондрашов Д.С. Влияние стабилизирующих добавок на свойства укрепленных портландцементом грунтов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 11. С. 6-10.
4. Меренцова Г.С., Дорошенко И.О. Особенности современной технологии устройства слоев оснований дорожных одежд из щебеночно-песчаных смесей, укрепленных портландцементом // Ползуновский альманах. 2023. № 1. С. 94-96.

5. Урханова Л.А., Лхасаранов С.А., Битуев А.В., Смирнягина Н.Н. Подбор состава укрепленных материалов для оснований автомобильных дорог с использованием золошлаковых смесей // Вестник ВСГУТУ. 2023. № 4 (91). С. 96-105.
6. Бедрин Е.А., Бедрина Е.А. Конкурентные преимущества инновационных материалов при устройстве укрепленных слоев дорожных одежд // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2019. Т. 16, № 1 (65). С. 52-61.
7. Хузиахметова К.Р., Коляндра Г.С. Применение обработанных щебеночно-песчаных смесей в основаниях дорожных одежд//Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. 2023.№ 4.С.63-69.
8. Лофлер М., Слободчикова Н.А. Методики подбора составов грунтов, укрепленных известью, для дорожного строительства // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2018. Т. 8. № 2. С. 141-147. DOI: 10.21285/2227-2917-2018-2-141-147.
9. Симчук Е.Н., Жданов К.А., Зарифов Р.Р. Исследование эффективности комплексных минеральных вяжущих в укреплении грунтов для дорожных конструкций//Дороги и мосты. 2023. № 2(50).С.309-322.
10. Подольский Вл.П., Матвиенко Ф.В., Строкин А.С., Борисов А.Е. Исследование влияния модификатора "ДОРЦЕМ ДС-1" на свойства цемента и физико-механические характеристики цементогрунта // Научный журнал строительства и архитектуры. 2017. № 1 (45). С. 84-92.
11. Меджидов Р.А., Магомедов Р.Я., Мурадалиев З.З. Цементация грунта в дорожном строительстве // Естественные и технические науки. 2024. № 3 (190). С. 133-135.
12. Матвиенко Ф.В., Паневин Н.И., Канищев А.Н., Шапаускас В.С. Исследование влияния модификатора MADOR на показатели морозостойкости и водостойкости укрепленных цементом дисперсных материалов для дорожного строительства // Научный журнал строительства и архитектуры. 2023. № 3 (71). С. 92-100.
13. Матуа В.П., Мирончук С.А., Матуа Р.В., Блягоз А.М. Влияние добавок "ANT" и "Nanostab" на процессы структурообразования укрепленных минеральными вяжущими щебеночно-песчаных смесей // Новые технологии. 2012. № 3. С. 80-84.
14. Траутвайн А.И., Акимов А.Е. Анализ эффективности использования добавки комплексного действия при укреплении песчаных и крупнообломочных грунтов//Дороги и мосты.2022.№ 1(47).С.307-324.
15. Левкович Т.И., Мевлидинов З.А., Тулянкина Н.А., Вишталенко М.В. Исследование прочности песчаных грунтов, укрепленных цементом с добавкой "ДорЦем ДС-1", для использования при строительстве оснований автомобильных дорог // Транспортные сооружения. 2019. Т. 6. № 2. С. 8-20.
16. Авдонин В.В., Ликомаскин А.И., Ерофеев В.Т. Исследование влияния химических добавок при комплексном методе укрепления цементом несвязных грунтов // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 2011. № 14. С. 127-131.
17. Коновалова Н.А., Дабижа О.Н., Панков П.П. Структурообразование цементогрунтов в присутствии стабилизирующей добавки криогелит // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2017. № 8 (704). С. 63-73.
18. Меренцова Г.С., Медведев Н.В., Добрынина А.А. Стабилизация грунтов рабочего слоя земляного полотна с применением полимерно-минеральной добавки "NICOFLOK" // Ползуновский альманах. 2022. № 1. С. 133-135.
19. Сивков С.П., Корчунов И.В., Потапова Е.Н., Дмитриева Е.А., Клименко Н.Н. Термодинамическая оценка активности соединений в цементах карбонатно-гидратационного твердения // Стекло и керамика. 2022. Т. 95, № 9 (1137). С. 34-43.
20. Сергеева А.М., Полякова Т.А. Улучшение эксплуатационных показателей покрытий грунтовых дорог путем применения добавок (стабилизаторов) // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2021. Том 11. № 2А. С. 179-185. DOI: 10.34670/AR.2021.28.89.022.

References:

1. Lukash E.A., Sushkov G.R. Study of the effect of stabilizing additives on physical and mechanical characteristics of portland cement-reinforced crushed stone-sand mixtures. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2025; 3 (173): 87-94. DOI: 10.71536/vd.2025.3c173.9.
2. Slobodchikova N.A., Klyuev S.V., Plyuta K.V. Dependence of the soils' elastic modulus reinforced with inorganic binders on compressive strength. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (5): 786-800. DOI:10.26518/2071-7296-2024-21-5-786-800.
3. Yadykina V.V., Lukash E.A., Kondrashov D.S. The influence of stabilizing additives on the properties of the ground strengthened by cement. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2017;11: 6-10.
4. Merentsova G.S., Doroshenko I.O. Features of modern technology for the construction of road base layers from crushed stone-sand mixtures reinforced with Portland cemen. *Polzunovsky almanac*. 2023; 1: 94-96.
5. Urkhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Bituev A.V., Smirnyagina N.N. Composition selection of reinforced materials for road foundations using mixes of ash and slag of thermal plants. *VSGUTU Bulletin*. 2023;4 (91):96-105.

6. Bedrin E.A., Bedrina E.A. Competitive advantages of innovative materials while the construction of road base strengthened layers//The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2019;vol16,1(65):52-61.
7. Khuziakhmetova K.R., Kolyandra G.S. The use of treated crushed stone-sand mixtures in road pavement bases. *Roads and transport infrastructure*. 2023; 4: 63-69.
8. Lofler M., Slobodchikova N.A. Methods for reinforcing soil compositions with lime for road construction *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2018; 8 (2): 141-147. DOI: 10.21285/2227- 2917-2018-2-141-147.
9. Simchuk E.N., Zhdanov K.A., Zarifov R.R. Study of the efficiency of hydraulic road binders in soil stabilization for road structures. *Roads and Bridges*. 2023; 2 (50): 309-322.
10. Podol'skii V.I.P., Matvienko F.V., Strokin A.S., Borisov A.E. Study of the effect of the «DORCEM DS-1» modifier on the properties of cement and physical and mechanical characteristics of cement foundations. *Scientific journal of construction and architecture*. 2017; 1 (45): 84-92.
11. Medzhidov R.A., Magomedov R.YA., Muradaliev Z.Z. Soil cementation in road construction. *Natural and technical sciences*. 2024; 3 (190): 133-135.
12. Matvienko F.V., Panevin N.I., Kanishchev A.N., Shapauskas V.C. Investigation of the effect of the MADOR modifier on the indicators of frost resistance and water resistance cement-reinforced dispersed materials for road construction. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2023;3(71): 92-100.
13. Matua V.P., Mironchuk S.A., Matua R.V., Blyagoz A.M. Effect of "ANT" and "Nanostab" additives on the structure forming processes of crushed stone and sand mixtures strengthened with mineral bindings. *New technologies*. 2012;3: 80-84.
14. Trautvain A.I., Akimov A.E. Efficiency analysis of using complex action additive when strengthening sandy and macrofragmental soils. *Roads and Bridges*. 2022; (47): 307-324.
15. Levkovich T.I., Mevlidinov Z.A., Tuljankina N.A., Vishtalenko M.V. The study of strength of sandy soils reinforced with cement with the addition of "DorZem DS-1", for use in the construction of foundations of roads. *Transport facilities*. 2019; 6(2): 8-20.
16. Avdonin V.V., Likomaskin A.I., Erofeev V.T. Study of the influence of chemical additives in the complex method of cement strengthening of non-cohesive soils. *Bulletin of the Volga Regional Branch of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences*. 2011; 14: 127-131.
17. Konovalova N.A., Dabizha O.N., Pankov P.P. Structural formation of cementogronts in the presence of stabilizing additive cryogelite. *News of higher educational institutions. Construction*. 2017;8 (704): 63-73.
18. Merentsova G.S., Medvedev N.V., Dobrynina A.A. Stabilization of soils of the working layer of the roadbed using the polymer-mineral additive "NICOFLOK". *Polzunovsky almanac*. 2022; 1: 133-135.
19. Sivkov S.P., Korchunov I.V., Potapova E.N., Dmitrieva E.A., Klimenko N.N. The activity of cements compounds in CO₂-hydration hardening conditions from the thermodynamic point of view. *Glass and ceramics*. 2022; 95, 9 (1137): 34-43.
20. Sergeeva A.M., Polyakova T.A. Improving the performance of dirt road surfaces by using additives (stabilizers). *Economy: yesterday, today, tomorrow*. 2021;11(2A): 179-185. DOI: 10.34670/AR.2021.28.89.022.

Сведения об авторах:

Лукаш Евгений Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина; svh8@yandex.ru

Гричаников Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина; forvag1@yandex.ru

Рогуленко Виталий Геннадиевич, магистрант кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина; vroguenko.2985@mail.ru

Донцова Евгения Владимировна, магистрант кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина; jecan@yandex.ru

Information about authors:

Evgeny A. Lukash, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Automobile roads and Railroads named after A.M. Gridchin; svh8@yandex.ru

Vladimir A. Grichanikov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc.Prof., Department of Automobile roads and Railroads named after A.M. Gridchin; forvag1@yandex.ru

Vitaly G. Rogulenko, Master's student, Department of Automobile roads and Railroads named after A.M. Gridchin; vroguenko.2985@mail.ru

Evgeniya V. Dontsova, Master's student, Department of Automobile roads and Railroads named after A.M. Gridchin; jecan@yandex.ru

Конфликт интересов / Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 27.09.2025.

Одобрена после рецензирования/Reviced 30.10.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 28.01.2026.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.04

DOI: 10.21822/2073-6185-2026-53-1-233-241



Оригинальная статья /Original article

**Анализ напряженно-деформированного состояния эксплуатируемых
железобетонных конструкций с использованием ультразвука**
Г.В. Несветаев¹, А.В. Коллеганов², Н.А. Коллеганов², А.Н. Ивлев³, А.М. Омаров⁴

¹Донской государственный технический университет,

¹344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия,

²ЗАО «Конструкторское бюро Ивлева» НПФ «Геотекспроектстрой»,

²355037, г. Ставрополь, ул. Доваторцев 44Б, офис 3, Россия,

³Северо-Кавказский федеральный университет,

³355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, Россия,

⁴Дагестанский государственный технический университет,

⁴367015, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Исследование и анализ параметров напряженно-деформированного состояния железобетонных балок с использованием периодического ультразвукового контроля в сжатой и растянутой зонах с целью разработки предложений по применению метода при обследовании и мониторинге эксплуатируемых железобетонных конструкций. **Метод.** Экспериментальные исследования проведены по схеме четырехточечного изгиба в соответствии с ГОСТ 8829-2018 с измерением прогибов в центре пролета и в точках приложения нагрузки и деформаций бетона на базе 500 мм на уровне сжатой и растянутой арматуры с расчетом кривизны, фиксацией появления и развития трещин и изменения скорости ультразвукового импульса в зоне чистого изгиба в сжатой и растянутой зонах сечения и расчетом длины нормальных трещин. Исследованы балки из бетонов классов В25 и В40 с коэффициентом армирования 0,0149 и 0,0111. **Результат.** Установлены зависимости относительной скорости ультразвукового импульса, изменения относительной длины нормальной трещины, жесткости сечения, модуля упругости, относительной высоты с ненарушенной сплошностью бетона в сечении, прогибов по длине балок в точках приложения нагрузки и в середине пролета от относительного изгибающего момента. Определено поэтапное изменение скорости ультразвукового импульса. В балках со схемой разрушения по поперечной силе рост скорости ультразвукового импульса в растянутой зоне не фиксируется. **Вывод.** Методика анализа напряженно-деформированного состояния с использованием дискретного измерения скорости ультразвукового импульса в сжатой и растянутой зонах железобетонных балок может быть использована при экспериментальных исследованиях, обследовании и мониторинге эксплуатируемых железобетонных конструкций.

Ключевые слова: железобетонные балки, скорость ультразвукового импульса, длина нормальной трещины, стадии напряженно-деформированного состояния

Для цитирования: Г.В. Несветаев, А.В. Коллеганов, Н.А. Коллеганов, А.Н. Ивлев, А.М. Омаров. Анализ напряженно-деформированного состояния эксплуатируемых железобетонных конструкций с использованием ультразвука. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(1):233-241. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-233-241.

**Analysis of the Stress-Strain State of operated reinforced Concrete Structures
Using Ultrasound**

G.V. Nesvetaev¹, A.V. Kolleganov², N.A. Kolleganov², A.N. Ivlev³, A.M. Omarov⁴

¹Don State Technical University,

¹ 1Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia,

²ZAO "Ivlev Design Bureau" NPF "Geotekspromstroy",

²44B Dovatorcev St., Office 3, Stavropol 355037, Russia,

³North Caucasus Federal University,

³1 Pushkin St., Stavropol 355017, Russia,

⁴Daghestan State Technical University,

⁴70 Imam Shamil Ave., Makhachkala 367015, Russia

Abstract. Objective. Research and analysis of parameters of the stress-strain state of reinforced concrete beams using periodic ultrasonic testing in compressed and tensile zones and development of proposals for the application of the method in the inspection and monitoring of reinforced concrete structures in operation. **Method.** Experimental studies were carried out using a four-point bending scheme in accordance with GOST 8829-2018 with measurements of deflections in the span center and at the points of load application and concrete deformations on a 500 mm base at the level of compressed and tensile reinforcement with calculation of curvature, recording the appearance and development of cracks and changes in the ultrasonic pulse velocity in the pure bending zone in the compressed and tensile zones of the section and calculating the length of normal cracks. The length of normal cracks was also calculated. Beams made of concrete with classes B25 and B40, with reinforcement coefficients of 0.0149 and 0.0111, were studied. **Result.** The relationships between the relative ultrasonic pulse velocity, the change in the relative normal crack length, the section stiffness, the elastic modulus, the relative height of the unbroken concrete section, and the deflections along the beam length at load application points and at midspan were determined. A gradual change in the ultrasonic pulse velocity was determined. In beams with a shear force failure pattern, no increase in the ultrasonic pulse velocity was detected in the tension zone. **Conclusion.** The proposed method for analyzing the stress-strain state using discrete measurement of the velocity of an ultrasonic pulse in compressed and stretched zones of reinforced concrete beams can be used in experimental studies and in the inspection and monitoring of operated reinforced concrete structures.

Keywords: reinforced concrete beams, ultrasonic pulse velocity, normal crack length, stress-strain state stages

For citation: G.V. Nesvetaev, A.V. Kolleganov, N.A. Kolleganov, A.N. Ivlev, A.M. Omarov. Analysis of the Stress-Strain State of operated reinforced concrete structures using ultrasound. Herald of Daghestan State Technical University. Technical sciences. 2026; 53(1):233-241. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-233-241

Введение. Одной из основных задач, решаемых в процессе эксплуатации строительных объектов, является организация контроля за напряженно-деформированным состоянием (НДС) основных несущих конструкций с целью обеспечения их механической надежности и эксплуатационной безопасности [1]. В соответствии с [2] задача решается периодическими обследованиями строительных конструкций или постоянным мониторингом за техническим состоянием объекта. Поскольку перманентный мониторинг процедура финансово затратная и трудоемкая, его используют при эксплуатации объектов повышенного уровня ответственности, уникальных и технически сложных сооружений, а также в случаях предаварийного состояния строительных конструкций, эксплуатация которых не может быть остановлена в силу их высокой социальной значимости, например, на предприятиях водоснабжения, энергетического комплекса и т.п. Для зданий и сооружений, регламент эксплуатации которых предполагает дискретные обследования, отследить динамику изменения напряженно-деформированного состояния строительных конструкций достаточно сложно. Информация об изменении параметров напряженно-деформированного состояния основных конструктивных элементов объекта позволяет своевременно принять меры организационно-технического характера по обеспечению его безопасной эксплуатации. К основным параметрам объективного контроля, характеризующим изменение технического состояния железобетонных конструкций, относятся прогибы и перемещения, но они в большей степени регламентируют их переход в аварийное состояние по достижению

предельно допустимых значений деформаций [3, 4]. Применяется контроль ширины раскрытия трещин.

Общепринятого критерия, описывающего все стадии работы железобетонных конструкций в процессе эксплуатации, в настоящее время не предложено. В [5] в качестве критерия надежности железобетонной балки на стадии эксплуатации рассматривается критерий длины трещины в бетоне.

Согласно [6], при условии «длина трещины $L_{\text{тр}} > 0,3$ рабочей высоты сечения балки h_0 » возможно изменение направления развития трещин на продольное, что может весьма негативно повлиять на несущую способность железобетонной балки вплоть до разрушения. Согласно [7], длина нормальной трещины в изгибаемой балке определяется с использованием метода ультразвукового контроля, то в качестве одного из наиболее перспективных вариантов организации контроля за напряженно-деформированным состоянием изгибаемых элементов целесообразно рассматривать дискретный контроль за развитием трещин ультразвуковым методом.

Сейсмоакустические и ультразвуковые [8, 9] методы, такие как импульсный, эхо-локации, ультразвуковой томографии [10] и другие широко применяются в практике современного строительства из монолитного железобетона [11-13]. Они используются для оценки качества выполнения бетонных работ: выявления скрытых дефектов, определения параметров армирования, контроля геометрических параметров сечения и сплошности конструкций [14, 15] при одностороннем доступе или полном отсутствии доступа к конструктивным элементам, а также для моделирования и прогноза [16].

Постановка задачи. Анализ напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов дискретной фиксацией изменения скорости распространения ультразвукового импульса в их сжатой и растянутой зонах позволяет оценивать техническое состояние эксплуатируемых конструкций. Поскольку при реализации метода нет необходимости учитывать влияние влажностного состояния бетона в момент измерений [17], метод может быть достаточно легко реализован. В настоящей работе предложена методика оценки НДС железобетонных балок с использованием периодического ультразвукового контроля.

Методы исследования. Экспериментальные исследования НДС железобетонных балок проведены по схеме четырехточечного изгиба в соответствии с ГОСТ 8829-2018 (рис.1, 2). Ультразвуковые датчики располагались в зоне действия максимального изгибающего момента в растянутой и сжатой зонах сечения по схеме поверхностного прозвучивания на базе 120 мм [18]. В процессе испытаний фиксировалось время прохождения ультразвукового импульса на каждом этапе нагружения. Контроль деформаций осуществлялся с использованием индикаторов часового типа ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм.

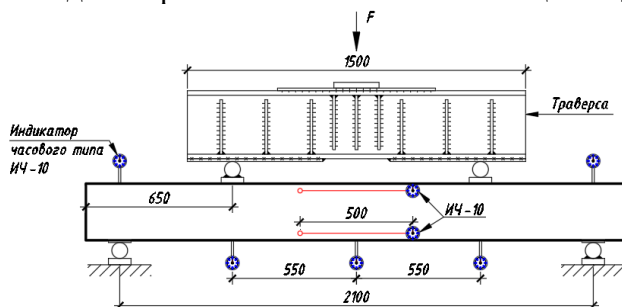


Рис. 1 – Схема проведения испытаний железобетонных балок на изгиб
Fig. 1 – Scheme of testing reinforced concrete beams for bending

Для испытаний были изготовлены железобетонные балки сечением 125x250(h) мм конструктивной длиной 2400 мм. Пролет в свету составлял 2100 мм. Схема нагружения принята по условию обеспечения достаточно высоких значений поперечной силы.



Рис. 2 – Общий вид испытательного стенда
Fig. 2 – General view of the test bench

Исследованы балки:

- из тяжелого бетона (ТБ) класса по прочности при сжатии В25 с начальным модулем упругости 28,75 ГПа с рабочей арматурой А500с d16 и d12 мм, (ТБ16 и ТБ12);
- из бетона каркасной структуры (БКС) [19] класса по прочности при сжатии В40, с начальным модулем упругости 38,95 ГПа с рабочей арматурой А500с d16 и d12 мм, (далее БКС16 и БКС12). Схемы армирования приведены на рис. 3. Для обеспечения разрушения балки БКС 16 по поперечной силе использовано недостаточное поперечное армирование.

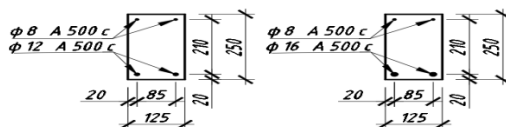


Рис. 3 – Схемы армирования железобетонных балок с различной формой достижения предельного состояния
Fig. 3 – Schemes of reinforcement of reinforced concrete beams with different forms of reaching the ultimate state

Нагружение балок производилось гидравлическим домкратом ступенями, не превышающими 10% от контрольной нагрузки по прочности в соответствии с ГОСТ 8829-2018. В процессе испытаний на всех этапах нагружения фиксировались: прогибы в центре пролета и в точках приложения нагрузки по рис. 1; деформации на уровне сжатой и растянутой арматуры на базе 500 мм по рис. 1; появление и развитие трещин (рис.2); изменение скорости УЗИ в зоне чистого изгиба в сжатой и растянутой зонах сечения. По результатам измерений определяли: изменение жесткости балок и прогибов [20]; изменение скорости УЗИ; изменение модуля упругости бетона по величине изменения динамического модуля упругости [21]. За относительную скорость УЗИ принимали отношение текущей скорости к первоначальной в ненагруженном состоянии. Расчеты прогибов и изменения жесткости сечений представлены в [20]. Расчет кривизны выполнен по формуле:

$$\frac{1}{r} = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_b}{h_0}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_s, \varepsilon_b$ – соответственно деформации бетона на уровне растянутой (рис. 1) и сжатой (рис. 1) арматуры.

Расчет длины трещины по результатам измерения скорости УЗИ выполнен в соответствии с представленной в [5, 7] методикой:

$$L_{crc} = \frac{v}{2} \sqrt{\left(\frac{\tau_{crc}}{\tau_0}\right)^2 - 1}, \quad (2)$$

где $v = 0,12/\tau_0$ – скорость УЗИ в сечении без трещины, м/с; τ_{crc}, τ_0 – соответственно время распространения УЗИ в сечении с трещиной и без трещины.

Обсуждение результатов. Разрушение балки ТБ16 произошло по бетону сжатой зоны. Разрушение балок ТБ12 и БКС12 произошло в результате достижения текучести растянутой арматуры. Разрушение балки БКС 16 произошло по поперечной силе в зоне среза (рис. 2). На рис. 4 представлена зависимость относительной скорости УЗИ в исследованных балках от относительного изгибающего момента.

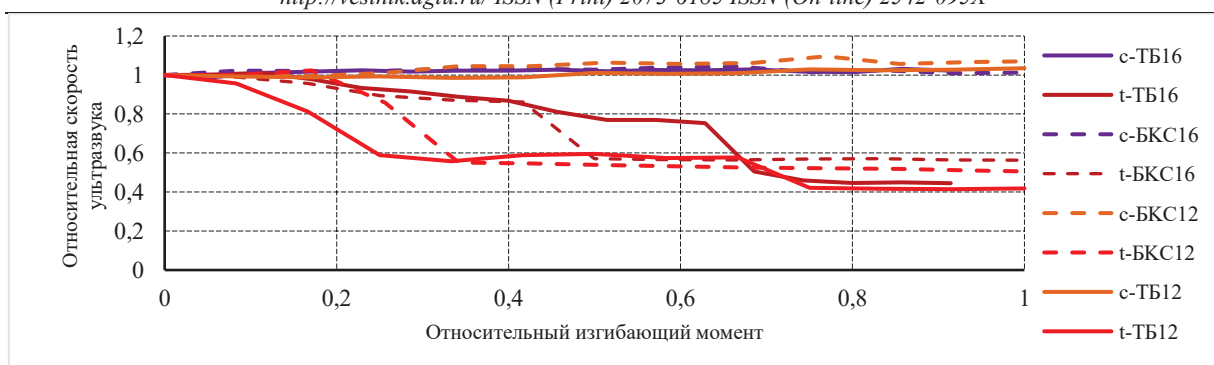


Рис. 4 – Зависимость относительной скорости УЗИ от относительного изгибающего момента: c, t – соответственно в зоне сжатого бетона, в зоне растянутого бетона;

16, 12 – диаметр рабочей арматуры, мм;

ТБ, БКС – балки из тяжелого бетона и бетона каркасной структуры

Fig. 4 – Dependence of the relative ultrasound speed on the relative bending moment:

c, t – in the compressed concrete zone, in the tensioned concrete zone, respectively;

16, 12 – diameter of the working reinforcement, mm;

TB, BKS – beams made of heavy concrete and frame concrete

На рис. 5 представлено изменение относительной длины трещины L_{crc}/h_0 , где $h_0 = 22,5$ см – рабочая высота сечения балок, определенной по изменению соотношения скоростей УЗИ (UPV) в сечении с трещиной и без трещины [5, 7], от величины относительного изгибающего момента.

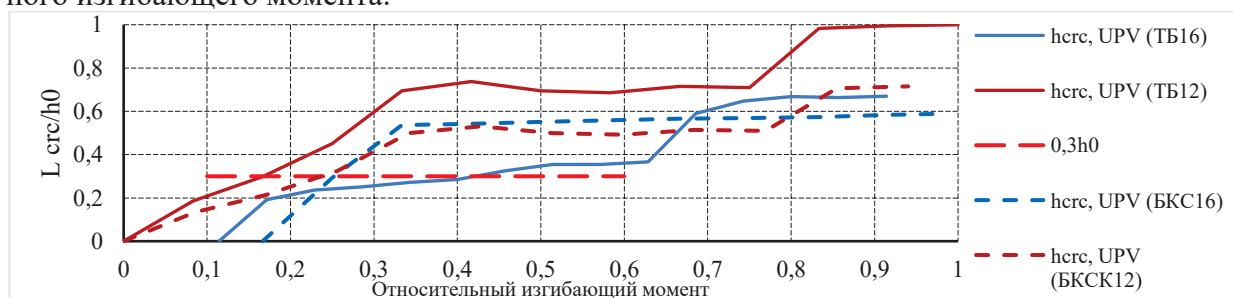


Рис. 5 – Изменение относительной длины трещины L_{crc}/h_0 , от величины относительного изгибающего момента, где 16, 12 – диаметр рабочей арматуры, мм;

ТБ, БКС – балки из тяжелого бетона и бетона каркасной структуры

Fig. 5 – Change in relative crack length L_{crc}/h_0 , depending on the relative bending moment

where 16, 12 are the diameter of the working reinforcement, mm;

TB, BKS are the beams made of heavy concrete and frame concrete

На рис. 6 представлено изменение относительных показателей жесткости сечения EI/EI_0 [20], модуля упругости E/E_0 и относительной высоты бетона с ненарушенной сплошностью в сечении $(H-h_{crc})/h_0$ для балок с рабочей арматурой d16 A500с.

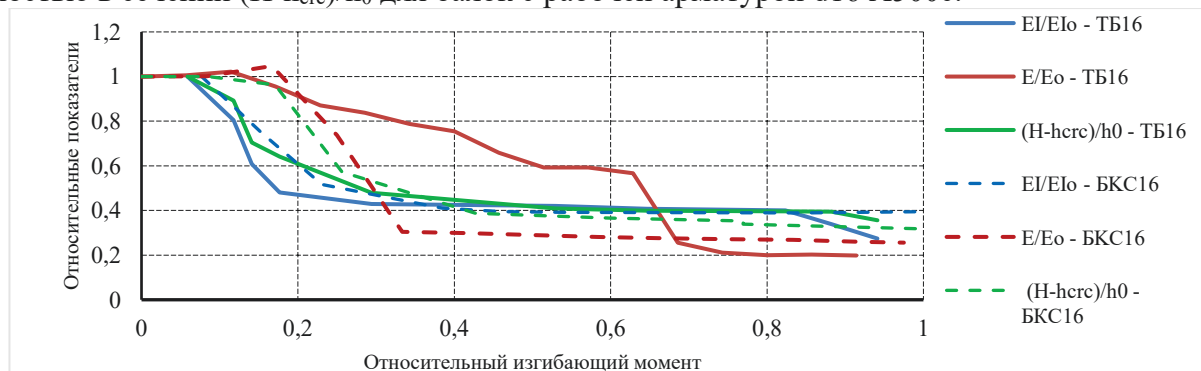


Рис. 6 – Изменение относительных показателей жесткости сечения EI/EI_0 [20], модуля упругости E/E_0 и относительной высоты бетона с ненарушенной сплошностью в сечении $(H-h_{crc})/h_0$, где ТБ, БКС – балки из тяжелого бетона и бетона каркасной структуры

Fig. 6 – Change in the relative stiffness indices of the section EI/EI_0 [20], the modulus of elasticity E/E_0 and the relative height of concrete with unbroken continuity in the section $(H-h_{crc})/h_0$ where TB, BKS are beams made of heavy concrete and frame concrete

На рис. 7 представлены значения прогибов по длине балки в точках приложения нагрузки (2, 4) и в середине пролета (3) по рис.1 в зависимости от величины относительного изгибающего момента балки БКС12.

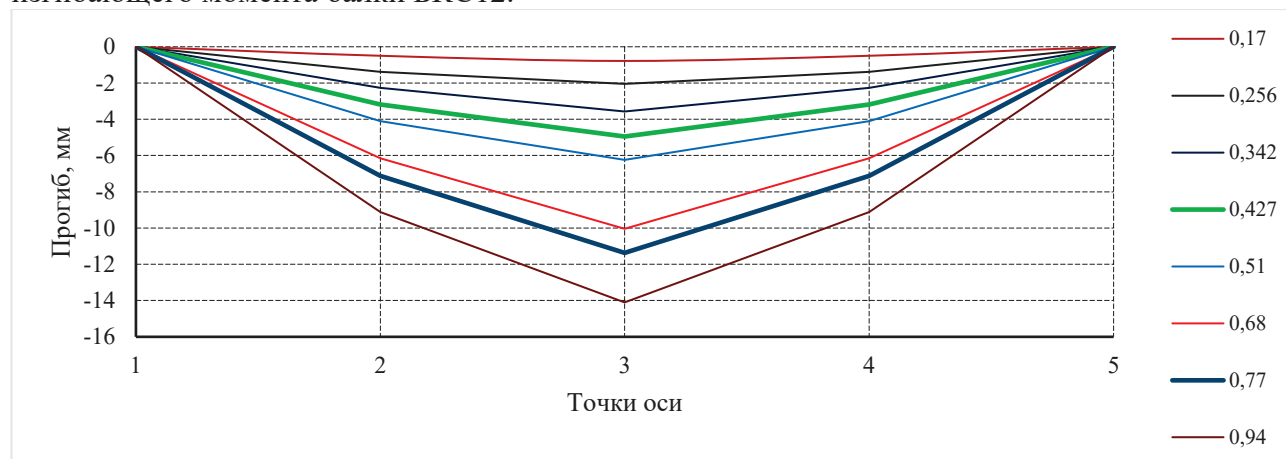


Рис. 7 – Значения прогибов по длине балки в точках приложения нагрузки (2,4) и в середине пролета (3) по рис.1 в зависимости от величины относительного изгибающего момента, где 0,17...0,94 – относительный изгибающий момент; 0,427 – появление видимой трещины в зоне постоянного изгибающего момента, 0,77 – появление видимой трещины в зоне среза

Fig. 7 – Values of deflections along the length of the beam at the points of load application (2,4) and in the middle of the span (3) according to Fig. 1 depending on the magnitude of the relative bending moment, where 0.17...0.94 is the relative bending moment; 0.427 is the appearance of a visible crack in the zone of constant bending moment, 0.77 is the appearance of a visible crack in the shear zone

На рис. 8 представлены значения прогибов по длине балки в точках приложения нагрузки (2, 4) и в середине пролета (3) по рис. 1 в зависимости от величины относительного изгибающего момента балки ТБ12.

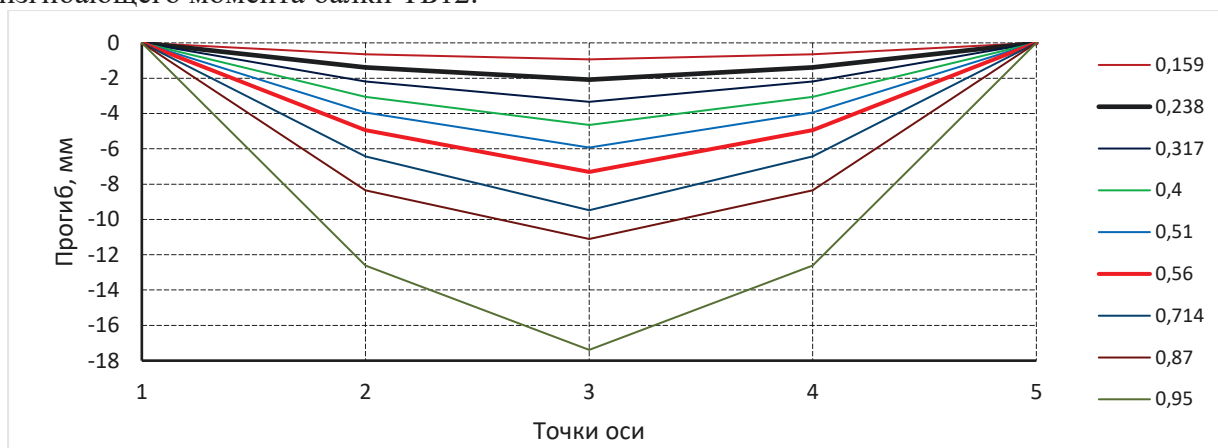


Рис. 8 – Значения прогибов по длине балки в точках приложения нагрузки (2,4) и в середине пролета (3) по рис.1 в зависимости от величины относительного изгибающего момента, где 0,159...0,95 – относительный изгибающий момент; 0,238 – появление видимой трещины в зоне постоянного изгибающего момента, 0,56 – появление видимой трещины в зоне среза

Fig. 8 – Values of deflections along the length of the beam at the points of load application (2,4) and in the middle of the span (3) according to Fig. 1 depending on the magnitude of the relative bending moment, where 0.159...0.95 is the relative bending moment; 0.238 is the appearance of a visible crack in the zone of constant bending moment, 0.56 is the appearance of a visible crack in the shear zone

В сжатой зоне сечения при всех уровнях нагружения скорость УЗИ остается практически постоянной (рис.4), имеет место незначительный, в пределах 8%, рост скорости УЗИ, что связано с уплотнением структуры бетона под влиянием сжимающих напряжений. В растянутой зоне сечения изменение скорости УЗИ в зависимости от уровня нагружения имеет сложный характер.

На первом этапе до уровня изгибающего момента $0,1 \dots 0,15 M_{ult}$ имеет место незначительное снижение скорости УЗИ вследствие разуплотнения структуры бетона в результате воздействия растягивающих напряжений. Далее, на втором этапе, имеет место падение,

достаточно резкое, но практически линейное, скорости УЗИ, причем в балках с арматурой d 12 это проявляется при меньшем уровне изгибающего момента, что связано с образованием нормальной трещины в сечении.

На третьем этапе, имеет место стабилизация скорости УЗИ, что можно трактовать как прекращение роста первоначально образовавшейся нормальной трещины (рис. 4). Стабилизация или замедленный рост первоначально образовавшейся трещины имеет место при уровне изгибающего момента от 0,2 до 0,75 M_{ult} (рис. 5), причем относительная длина трещины L_{crc}/h_0 при этом составляет от 0,3 до 0,7 h_0 (рис. 2).

Как отмечалось выше, по данным [6] при $L_{crc}/h_0 > 0,3$ возможно изменение траектории трещины. Стабилизация скорости УЗИ в зоне первоначально образовавшейся трещины сопровождается существенным замедлением уменьшения жесткости сечения (рис. 6). Некоторое снижение жесткости сечения (рис. 6) на фоне относительной стабилизации скорости УЗИ (длины первоначально образовавшейся трещины) и рост прогибов балки (рис. 7) происходит вследствие формирования сетки нормальных, в т.ч. за пределами зоны чистого изгиба, и наклонных трещин (рис. 2).

На четвертом этапе, при уровне изгибающего момента 0,65...0,75 M_{ult} в балках, разрушение которых произошло вследствие текучести растянутой арматуры (ТБ12 и БКС12) или по бетону сжатой зоны (ТБ16), имеет место резкий рост длины первоначально образовавшейся трещины, рост прогибов и текучесть арматуры. У балок ТБ12 и БКС12 M_{ult} , определенный по СП 63.13330-2018, составил 0,68...0,69 от экспериментального M_{ult} , а у балки ТБ16 – 0,8. У балки БКС16, разрушение которой произошло по поперечной силе в зоне среза, подобного скачка скорости УЗИ не наблюдается (рис.5). Разрушение по поперечной силе произошло при величине изгибающего момента меньшей расчетного для нормального сечения значения.

Вывод. Проведение обследования и мониторинга эксплуатируемых железобетонных конструкций зданий и сооружений предусматривает оценку их технического состояния на основе параметров объективного контроля.

Анализ напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций на разных стадиях эксплуатации может быть выполнен ультразвуковым методом, основанным на фиксации скорости распространения ультразвукового импульса в сжатой и растянутой области сечений в зоне действия максимального изгибающего момента. При фиксации в обследуемой балке нормальных трещин замеры следует начинать с трещины с наибольшей шириной раскрытия.

Для эксплуатируемых железобетонных конструкций сами по себе абсолютные значения скорости распространения ультразвука не могут являться критерием оценки их напряженно-деформированного состояния, поскольку отсутствует информация о первоначальных, базовых измерениях, позволяющих выполнить сравнительный анализ изменения контролируемого параметра.

В качестве такого критерия целесообразно использование отношения скоростей ультразвукового импульса в сжатой и растянутой зонах сечения наряду с определением длины нормальной трещины и контролем ширины ее раскрытия.

Предварительно можно рассматривать фиксацию по результатам ультразвукового контроля резкого роста величины L_{crc}/h_0 при ее значении более 0,35...0,5 h_0 как сигнал о переходе балок к ограниченно-работоспособному, а более 0,5 h_0 к недопустимому и даже аварийному состоянию [22].

Предложенная методика анализа напряженно-деформированного состояния балок с использованием ультразвукового контроля в сжатой и растянутой зонах может быть использована при обследовании и мониторинге эксплуатируемых железобетонных конструкций и в научно-исследовательских целях при стендовых испытаниях экспериментальных железобетонных конструкций.

Библиографический список:

1. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений №384-ФЗ.
2. ГОСТ 31937-2024 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.
3. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия.
4. СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции.
5. Уткин, В. С. Расчет надежности железобетонной балки на стадии эксплуатации по критерию длины трещины в бетоне / В.С. Уткин, С.А. Соловьев // Вестник МГСУ. – 2016. – № 1. – С. 68-79.
6. Пересыпкин Е.Н. Расчет стержневых железобетонных элементов. М.: Стройиздат, 1988. 168 с.
7. Бедов А.И., Сапрыкин В.Ф. Обследование и реконструкция железобетонных и каменных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений. М.: Изд-во АСВ, 1995. 192 с.
8. Капустин В.В., Чуркин А.А., Лозовский И.Н., Кувалдин А.В. Возможности сейсмоакустических и ультразвуковых методов при контроле качества свайных фундаментов//Геотехника. 2018. Т.10. № 5-6. С.62-71.
9. ГОСТ Р 72171-2025. Национальный стандарт Российской Федерации. Сваи. Сейсмоакустические методы контроля сплошности бетона и длины свай.
10. Лозовский И.Н., Чуркин А.А. Контроль сплошности буронабивных свай методом межскважинной ультразвуковой томографии // Транспортное строительство. 2018. № 7.
11. Тучков, В.А. Определение прочности бетона свай опоры моста на основе результатов ультразвуковой дефектоскопии / В.А. Тучков, В.С. Федорова // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. – 2024. – № 1. – С. 198-203.
12. Лозовский, И.Н. Численное моделирование ультразвукового контроля сплошности свай / И.Н. Лозовский, Р.А. Жостков, А.А. Чуркин // Дефектоскопия. – 2020. – № 1. – С. 3-13. – DOI 10.31857/S0130308220010017.
13. ASTM D6760-16. Standard test method for integrity testing of concrete deep foundations by ultrasonic crosshole testing. West Conshohocken, USA: ASTM International, 2016. P. 8. DOI: 10.1520/D6760-16.
14. Moran M., Brettman T., Hertlein B., Meyer M., Whitmire B. Deep Foundations Institute. guideline for interpretation of nondestructive integrity testing of augered cast-in-place and drilled displacement piles. New Jersey, USA: DFI, 2012. P. 39.
15. Мухин А.А., Лозовский И.Н., Чуркин А.А. СТО ЭГЕОС 1-1.1-001-2018. Применение неразрушающего контроля сплошности свай ультразвуковым методом. М., 2018. 22 с.
16. Жостков Р.А. Программа для моделирования ультразвуковой дефектоскопии буронабивных свай / Номер гос. регистрации программы для ЭВМ 2018665157. Дата регистрации 14.11.2018. Бюл. 12.
17. Несветаев, Г.В. Особенности неразрушающего контроля прочности бетона эксплуатируемых железобетонных конструкций / Г.В. Несветаев, А.В. Коллеганов, Н.А. Коллеганов // Интернет-журнал Науковедение. – 2017. – Т. 9, № 2.
18. ГОСТ 17624-2021 Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности.
19. Маилян, Д.Р. Особенности напряженно-деформированного состояния нормальных сечений железобетонных балок с бетоном каркасной структуры в сжатой зоне / Д.Р. Маилян, Г.В. Несветаев, Н.А. Коллеганов // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 7(103).
20. Маилян, Д.Р. Определение жесткости и кривизны двухслойных железобетонных балок с бетоном каркасной структуры в сжатой зоне / Д.Р. Маилян, Г.В. Несветаев, Н.А. Коллеганов // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 3(99).
21. МИ 11-87. Методические указания. ГСИ. Прочностные и деформационные характеристики бетонов при одноосном кратковременном статическом сжатии и растяжении. Методика выполнения измерений. М.: Издательство стандартов, 1989. 89 с.
22. Методическое пособие по назначению срока службы бетонных и железобетонных конструкций с учетом воздействия среды эксплуатации на их жизненный цикл. - - М.: Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве, 2019. – 122с.

References:

1. Technical Regulations on the safety of buildings and structures" No. 384-FZ.
2. GOST 31937-2024 Buildings and structures. Rules of inspection and monitoring of technical condition.
3. SP 20.13330.2016 Loads and impacts.
4. SP 63.13330.2018 Concrete and reinforced concrete structures.
5. Utkin V.S., Soloviev S.A. Calculation of reliability of reinforced concrete beams at the stage of operation according to the criterion of crack length in concrete. *Bulletin of MGSU*. 2016.;1: 68-79.
6. Peresypkin E.N. Calculation of core reinforced concrete elements. M. N.: Stroyizdat, 1988:168 p.
7. Bedova, I.N., Saprykin, V.F. Inspection and reconstruction of reinforced concrete and stone structures of operated buildings and structures. Moscow: Publishing House of the DIA, 1995:192 p.
8. Kapustina, V.V., Churkin, A.A., Lozovsky I.N., Kuvaldin A.V. Possibilities of seismoacoustic and ultrasonic methods in quality control of pile foundations. *Geotechnics*. 2018;10(5-6):62-71.

9. GOST R 72171-2025. The national standard of the Russian Federation. Piles. Seismoacoustic methods for monitoring concrete continuity and pile length
10. Lozovskiy, I.N., Churkin, A.A. Continuity control of borehole piles by downhole ultrasound tomography *Transport construction*. 2018:.
11. Tuchkov, V.A. Determination of concrete strength of pile bridge supports based on the results of ultrasonic flaw detection . V.A. Tuchkov, V.S. Fedorova. *Far East: problems of development of the architectural and construction complex*. 2024; 1:198-203.
12. Lozovsky, I.N. Numerical modeling of ultrasonic pile continuity control / I.N. Lozovsky, R.A. Zhostkov, A.A. Churkin. *Defectoscopy*. 2020;1:I. 3-13. – DOI 10.31857/S0130308220010017.
13. ASTM D6760-16. Standard test method for integrity testing of concrete deep foundations by ultrasonic cross-hole testing. West Conshohocken, USA: ASTM International, 2016; 8. DOI: 10.1520/D6760-16.
14. Moran M., Brettmann T., Hertlein B., Meyer M., Whitmire B. Deep Foundations Institute. guideline for interpretation of nondestructive integrity testing of augered cast-in-place and drilled displacement piles. New Jersey, USA: DFI, 2012: 39.
15. Mukhin A.A., Lozovsky I.N., Churkin A.A. STO AEGEOS 1-1.1-001-2018. Application of non-destructive testing of pile continuity by ultrasonic method. Moscow, 2018:22 p.
16. Zhostkov R.A. A program for modeling ultrasonic flaw detection of bored piles / State registration number of the computer program 2018665157. Registration date 11/14/2018. Byul. 12.
17. Nesvetaev G.V., A.V. Kolleganov, N.A. Kolleganov. Features of non-destructive testing of concrete strength of operated reinforced concrete structures. *Online journal of Science Studies*. 2017; 9(2).
18. GOST 17624-2021 Concrete. Ultrasonic strength determination method.
19. Mailyan, D.R. Features of the stress-strain state of normal sections of reinforced concrete beams with concrete frame structure in a compressed zone. D.R. Mailyan, G.V. Nesvetaev, N.A. Kolleganov. *Engineering Bulletin of the Don*. 2023;7(103).
20. Mailyan, D.R. Determination of rigidity and curvature of double-layered reinforced concrete beams with concrete frame structure in a compressed zone. D.R. Mailyan, G.V. Nesvetaev, N.A. Kolleganov. *Engineering Bulletin of the Don*. 2023;№ 3(99).
21. MI 11-87. Methodological guidelines. GSI. Strength and deformation characteristics of concrete under uniaxial short-term static compression and stretching. Measurement methodology. Moscow: Publishing House of Standards, 1989:89 p.
22. Methodological guide on the purpose of the service life of concrete and reinforced concrete structures, taking into account the impact of the operating environment on their life cycle. Moscow: Federal Center for Standardization, Standardization and Technical Conformity Assessment in Construction, 2019:122 p.

Сведения об авторах:

Несветаев Григорий Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология строительного производства»; nesgrin@yandex.ru

Коллеганов Алексей Вячеславович, кандидат технических наук, директор; alekskoll@mail.ru

Коллеганов Никита Алексеевич, кандидат технических наук, инженер-конструктор; nikita.kolleganov@mail.ru

Ивлев Андрей Николаевич, магистрант, инженер-конструктор; iv.andrey.stav26@yandex.ru

Омаров Абдула Магомедович, преподаватель кафедры «Технология и организация строительного производства»; omarov_abdula@mail.ru

Information about the authors:

Grigory V. Nesvetaev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Construction Production Technology; nesgrin@yandex.ru

Alexey V. Kolleganov, Cand. Sci. (Eng.), Director; alekskoll@mail.ru

Nikita A. Kolleganov, Cand. Sci. (Eng.), Engineer-constructor; nikita.kolleganov@mail.ru

Andrey N. Ivlev, Master's student, Engineer-constructor; iv.andrey.stav26@yandex.ru

Abdul M. Omarov, Lecturer, Department of Technology and Organization of Construction Production; omarov_abdula@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 20.11.2025.

Одобрена после рецензирования/Reviced 21.12.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 15.01.2026.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 666.974.2; 6903

DOI: 10.21822/2073-6185-2026-53-1-242-251



Оригинальная статья /Original article

**Исследование влияния методов получения полисиликатов натрия,
силикатного модуля и концентрации связующего на адгезию
композиционного вяжущего**

Б.Д. Тотурбиев¹, М.М. Журавлев², А.А. Тотурбиев³

¹Института геологии ДФИЦ РАН,

¹367030, г. Махачкала, ул. М.Ярагского 75, Россия,

²Дагестанский государственный технический университет,

²367015, г. Махачкала, проспект Имама Шамиля 70, Россия,

³Дагестанский государственный университет народного хозяйства,

³367000, г. Махачкала, ул. Д. Атаева 5, Россия

Резюме. Цель. Цель исследования заключается в выявлении факторов, определяющих прочность клеевых соединений в композитных материалах, содержащих полисиликаты натрия. **Метод.** Проанализировано влияние методик синтеза полисиликатов натрия на адгезионные свойства композиционных вяжущих. Рассматривались традиционные и инновационные методы, включая гидротермальные, автоклавные и золь-гель технологии. Особое внимание уделялось параметрам температуры, давления и времени реакции. Полисиликат натрия вне композиции получали взаимодействием безводного силиката натрия с раствором гидрозоля диоксида кремния при 70–90 °С и выдержкой до 0,5 часа. **Результат.** Определено влияние различных методов получения полисиликатов натрия, а также изменение силикатного модуля и концентрации связующего на адгезионные свойства материалов. Определены прочностные характеристики образцов при различных внешних воздействиях. Установлено, что прочность клеевого шва на основе полисиликатов натрия зависит от их концентрации и условий синтеза. Оптимальная концентрация полисиликатной связки составляет 0,14–0,2 г/см² для связок, полученных в композиции, и 0,2–0,28 г/см² для синтезированных вне композиции. Экспериментально установлено, что образцы, склеенные полисиликатами, синтезированными отдельно от композитной смеси, разрушаются по линии адгезива. **Вывод.** Полученные результаты можно использовать для разработки новых рецептов и методик, способствующих улучшению характеристик и долговечности строительных материалов. В последующих исследованиях планируется использовать полисиликат натрия с модулем не более 10 для оптимизации свойств и увеличения срока службы материалов при высоких температурах. Перспективным направлением является разработка жаростойких композитов с высоким силикатным модулем и уменьшенным содержанием Na₂O, что способствует улучшению огнеупорности и термомеханических характеристик.

Ключевые слова: полисиликат натрия, адгезия, прочность, связка, жаростойких композитов, клеевое соединение, силикатный модуль

Для цитирования: Б.Д. Тотурбиев, М.М. Журавлев, А.А. Тотурбиев. Исследование влияния методов получения полисиликатов натрия, силикатного модуля и концентрации связующего на адгезию композиционного вяжущего. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(1):242–251. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-242-251.

**A Study of the Effect of Sodium Polysilicate Production Methods, Silicate Modulus,
and Binder Concentration on Composite Binder Adhesion**

B.D. Toturbiev¹, M.M. Zhuravlev², A.A. Toturbiev³

¹Institute of Geology, Far Eastern Federal Research Center, Russian Academy of Sciences,

¹ 75 M.Yaragskogo St., Makhachkala 367030, Russia,

² Daghestan State Technical University,

² 70 Imam Shamil Ave., Makhachkala 367015, Russia,

³ Daghestan State University of National Economy,

³ 5 D. Ataeva St., Makhachkala 367000, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to identify the factors determining the strength of adhesive joints in composite materials containing sodium polysilicates. **Method.** The influence of sodium polysilicate synthesis methods on the adhesive properties of composite binders was analyzed. Traditional and innovative methods, including hydrothermal, autoclave, and sol-gel technologies, were considered. Particular attention was paid to the parameters of temperature, pressure, and reaction time. Sodium polysilicate was obtained outside the composite by reacting anhydrous sodium silicate with a silicon dioxide hydrosol solution at 70–90 °C and holding for up to 0.5 hours. **Result.** The influence of various methods for producing sodium polysilicates, as well as changes in the silicate modulus and binder concentration on the adhesive properties of the materials, was determined. The strength characteristics of the samples under various external influences were determined. It was found that the strength of the adhesive joint based on sodium polysilicates depends on their concentration and synthesis conditions. The optimal concentration of the polysilicate binder is 0.14-0.2 g/cm² for binders obtained in the composite, and 0.2-0.28 g/cm² for those synthesized separately. Experiments have shown that samples bonded with polysilicates synthesized separately from the composite mixture fail along the adhesive line. **Conclusion.** The obtained results can be used to develop new formulations and methods for improving the performance and durability of building materials. Future research plans to use sodium polysilicate with a modulus of no more than 10 to optimize properties and extend the service life of materials at high temperatures. A promising direction is the development of heat-resistant composites with a high silicate modulus and reduced Na₂O content, which contributes to improved fire resistance and thermomechanical properties.

Keywords: sodium polysilicate, adhesion, strength, bond, heat-resistant composites, adhesive bond, silicate modulus.

For citation: B.D. Toturbiev, M.M. Zhuravlev, A.A. Toturbiev. Study of the influence of sodium polysilicate production methods, silicate modulus, and binder concentration on the adhesion of composite binders. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):242-251. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-242-251.

Введение. Применение нанотехнологий и наноматериалов открывает перспективы для создания новых строительных материалов с улучшенными характеристиками. Это достигается благодаря возможности изменения структуры на атомарном уровне, модификации минералогического состава и разработке композитов с особыми свойствами [1-9]. В этой связи можно отметить перспективность и актуальность исследований, направленных на расширение номенклатуры наноструктурированных строительных материалов, в том числе огнеупорных из нанодисперсных высокомодульных силикатных систем (полисиликаты) с повышенными эксплуатационными свойствами. В связи с этим стоит отметить перспективность и важность исследований, направленных на расширение ассортимента наноструктурированных строительных материалов, включая огнеупорные изделия на основе нанодисперсных высокомодульных силикатных систем (полисиликатов) с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Одним из ключевых параметров силикатных систем является показатель SiO₂/Na₂O, известный как силикатный модуль (М). В современной классификации силикатных материалов этот модуль служит основой для определения их состояния. Согласно данной классификации, их можно разделить на следующие группы: высокощелочные системы (М < 2); жидкие стекла (М = 2...4); полисиликаты (М = 4...25); золи (М > 25) [10-14]. Полисиликаты, также известные как высокомодульные стекла, занимают промежуточное положение

между жидкими стеклами и кремнезольми. Их частицы имеют размер около 4-5 нанометров и классифицируются как наноматериалы. Главное отличие полисиликатов от жидких стекол и высокощелочных систем заключается в их полимерной структуре, которая составляет более 60% от общего содержания кремнезема. Это обеспечивает высокую прочность образующихся гелевых структур.

Полисиликаты обладают особыми связующими характеристиками, что позволяет их эффективно использовать в различных композициях. Применение полисиликатов в клеевых смесях повышает водостойкость материалов и улучшает термостойкость огнеупоров, что делает их незаменимыми для создания жаростойких вяжущих и бетонов [15-18].

Постановка задачи. Анализируя исследования по синтезу полисиликатов, можно выделить основные исходные компоненты: золи кремниевой кислоты, а также водные и безводные силикаты щелочных металлов, как указано в работах [1-18]. В наших исследованиях мы использовали безводные силикаты натрия, так как они наиболее часто применяются для получения концентрированных коллоидных щелочных растворов, кремнезоль и других силикатных систем. Это связано с их способностью не кристаллизоваться и наличием ряда других свойств, а также с их относительно низкой стоимостью.

Методы исследования. В рамках данного исследования были рассмотрены как традиционные, так и инновационные методы к синтезу, полисиликатов натрия. Эти методы варьируются по параметрам температуры, давления и времени реакции, что позволяет целенаправленно управлять характеристиками получаемых полисиликатов и, соответственно, адгезионными свойствами композитов. Полисиликат натрия с кремнеземистым модулем 6-6.5 ($\text{SiO}_2\text{:Na}_2\text{O}$) получали путем взаимодействия безводного силиката натрия с 30%-ным водным раствором гидрозоля диоксида кремния при 70-90°C, с последующей выдержкой не более 0.5 ч [14].

Исследование проводилось с целью выявления ключевых факторов, определяющих эффективность и надежность адгезионных соединений, что имеет первостепенное значение для разработки современных строительных и промышленных материалов. Особое внимание уделялось методам получения полисиликатов натрия, поскольку они существенно влияют на физико-химические свойства конечного продукта.

Значение силикатного модуля ($\text{SiO}_2\text{/Na}_2\text{O}$) также является критическим параметром, определяющим структуру и свойства полисиликатов натрия. В ходе исследования установлено, что изменение данного параметра оказывает значительное влияние на адгезию композиционных вяжущих. Оптимальное соотношение SiO_2 и Na_2O способствует формированию мелкозернистой структуры, улучшающей взаимодействие между связующим и наполнителем, что, в свою очередь, повышает прочность и долговечность адгезионных соединений. Концентрация связующего является еще одним важным фактором, влияющим на адгезивные характеристики композиционных вяжущих.

Исследование показало, что увеличение концентрации связующего приводит к улучшению адгезии, однако при этом возрастает риск снижения прочностных характеристик материала. Таким образом, необходим баланс между концентрацией связующего и другими параметрами для достижения оптимальных адгезионных свойств при сохранении требуемой прочности.

Обсуждение результатов. В результате проведенного анализа установлено, что комплексный подход, учитывающий методы получения полисиликатов натрия, значения силикатного модуля и концентрацию связующего, позволяет значительно улучшить адгезионные свойства композиционных вяжущих материалов. Полученные данные могут быть использованы для разработки новых рецептур и технологий, направленных на повышение эффективности и надежности строительных и промышленных материалов, что имеет важное значение для развития материаловедения и строительства.

Упрочнение композиционных систем на основе жидкостного стекла - это сложный процесс, включающий множество факторов, где адгезионные и когезионные механизмы играют решающую роль. Для достижения высокой прочности таких систем необходимо

обеспечить эффективное смачивание жидким стеклом поверхности частиц заполнителя. Этот процесс способствует образованию объемной когезии, что обеспечивает монолитность и структурную целостность материала. В результате синергетического взаимодействия компонентов жидкостекольной композиции значительно улучшаются их механические характеристики, что подтверждается многочисленными исследованиями в этой области [13-21].

В ходе исследования безводных силикат-натриевых композиций (БСН), было обнаружено их свойство обеспечивать сцепление системы благодаря адгезионному взаимодействию с частицами заполнителя. Этот механизм, известный как контактное связывание, основывается на фундаментальных принципах взаимодействия двух поверхностей через тонкие клеящие слои. Исследования в области материаловедения подтверждают высокую эффективность и надежность данного механизма [13,15,17,19]. Для достижения оптимальной результативности клеевого соединения необходимо учитывать два основных параметра, их тщательный анализ и правильная оценка в обеспечении наилучших результатов. Качество клеевого соединения зависит от двух ключевых факторов: способности клея взаимодействовать с поверхностями материалов и его собственной прочности. Эти характеристики определяются адгезией клея к материалам и когезионной прочностью клеевого слоя. Эти параметры критически важны для обеспечения долговечности и надежности контакта, а также общей устойчивости конструкции при эксплуатационных нагрузках.

Долговечность клеевого соединения - это сложный показатель, который зависит от множества взаимосвязанных факторов. К ним относятся физико-химические свойства поверхностей материалов и их структурные изменения, тип взаимодействия клея с основой, скорость процесса схватывания, площадь соприкосновения, толщина клеевого слоя, а также условия окружающей среды, включая температуру и влажность, и их изменения в процессе эксплуатации. Эти факторы находятся в сложной синергетической зависимости, что требует глубокого понимания механизмов адгезии и когезии для обеспечения надежного и долговечного клеевого соединения. Особое значение имеют физико-химические свойства клеевых составов, включая их молекулярную структуру, реологические характеристики, способность к диффузии и адгезионную активность. Важно также исследовать кинетику формирования межфазных границ и механизмы химического связывания, что позволяет оптимизировать состав клеев и технологические параметры процесса для достижения требуемых эксплуатационных характеристик.

Всесторонний анализ этих факторов позволяет разработать научно обоснованные методы повышения прочности и долговечности клеевых соединений, что является важной задачей в области материаловедения и технологий производства композитных материалов. Современные теории адгезии, такие как адсорбционная, электрическая и диффузионная, сталкиваются с серьезными ограничениями при объяснении сложных процессов взаимодействия материалов на молекулярном уровне. Тем не менее, результаты экспериментов и эмпирические данные показывают, что для получения надежного клеевого соединения необходимо обеспечить качественное и оптимальное взаимодействие молекул адгезива с субстратом. Этот феномен универсален и не зависит от типа материалов, участвующих в процессе. Адгезивные связи представляют собой сложную систему взаимодействий, включающую разнообразные физические и химические процессы. В их основе лежат вандер-ваальсовы силы, водородные связи, а также комбинации ионных и ковалентных взаимодействий. Важную роль в этом контексте играют процессы хемосорбции и физической адсорбции, а также их сложные взаимодействия, обеспечивающие первоначальное связывание молекул адгезива с поверхностью субстрата. Следует также учитывать диффузионные процессы на границе раздела фаз, которые могут быть вызваны такими факторами, как тепловое воздействие, механическое давление, воздействие растворителей или их комбинации. Диффузия молекул адгезива в субстрат и молекул субстрата в адгезив способствует формированию межфазной зоны с высокой плотностью связей, что значительно увеличивает прочность и долговечность клеевого соединения.

Адгезия в вязкопластическом состоянии зависит от химической природы адгезива и характеристик поверхности, с которой он контактирует. Для достижения необходимых характеристик материала, адгезивы должны эффективно взаимодействовать с поверхностью заполнителя, что представляет собой первый этап адгезионного процесса. Этот этап определяется критическим значением поверхностного натяжения смачивания (γ_c). Степень смачивания клеевой смесью контактирующих поверхностей зависит от соотношения поверхностных натяжений в трёх зонах контакта: клей-воздух (γ_{kv}), твёрдая поверхность-воздух (γ_{vp}) и клей-твёрдая поверхность (γ_{kp}). Полное смачивание наступает, когда γ_{kv} превышает γ_c . Для регулирования смачиваемости и улучшения адгезионных характеристик в состав клеев вводят поверхностно-активные вещества (ПАВ), пластификаторы, разбавители, наполнители и другие компоненты.

Адсорбция, являясь основополагающим физико-химическим процессом, оказывает значительное влияние на адгезионные свойства клеевых составов и модификацию структуры поверхностных слоев различных материалов. На этом этапе формирования клеевого соединения происходит сложное взаимодействие молекул клея с поверхностными структурами твердых тел, что приводит к возникновению адсорбционных слоев на границе раздела фаз. В результате этого процесса концентрация адсорбированных молекул в поверхностном слое увеличивается, что способствует созданию прочной когезионной связи между клеевым составом и подложкой.

Увеличение удельной поверхности адсорбента приводит к значительному усилению молекулярных взаимодействий, что, в свою очередь, повышает адсорбционную активность и улучшает межфазное взаимодействие. Это явление можно объяснить с позиций теории адсорбции. Рост удельной поверхности адсорбента увеличивает количество активных центров, что способствует более эффективному захвату молекул из газовой или жидкой среды. Увеличение удельной поверхности адсорбента играет ключевую роль в повышении эффективности адсорбционного процесса и улучшении его кинетических характеристик. В некоторых случаях адсорбционные процессы сопровождаются химическим взаимодействием между адсорбентом и адсорбатом. Это явление, известное как хемосорбция, является важным аспектом адсорбционных процессов. Хемосорбция приводит к образованию прочных химических связей между поверхностями, значительно повышая адгезионную прочность клеевого соединения. Таким образом, адсорбционные и хемосорбционные явления являются основополагающими факторами, определяющими эффективность и долговечность клеевых соединений в различных областях применения.

Прочность клеевого соединения определяется толщиной клеевого слоя, которая, в свою очередь, зависит от типа клеевого вещества и характеристик поверхности твердого тела. Повышение толщины клеевого слоя может ухудшить его прочность из-за появления структурных дефектов, таких как микропоры и микротрещины. Эти дефекты уменьшают площадь контакта между клеевым составом и поверхностью, что негативно сказывается на общей прочности соединения.

Важнейшим параметром, определяющим прочность клеевого соединения, является когезионная прочность клеевой композиции. Она обусловлена интенсивностью межмолекулярных взаимодействий, таких как водородные связи, ван-дер-ваальсовы силы и другие типы молекулярных взаимодействий, которые обеспечивают сцепление молекул клеевого вещества друг с другом. Когезионная прочность играет ключевую роль в обеспечении общей целостности и долговечности клеевого соединения, а также в определении его устойчивости к внешним воздействиям, таким как температурные колебания, механические нагрузки и химическое воздействие.

Таким образом, создание структуры в композициях, основанных на полисиликате натрия, представляет собой сложный и многогранный процесс. Ключевым этапом этого процесса является реакция мельчайших наночастиц безводного силиката натрия с кремнеземом. В результате этого взаимодействия формируются полисиликатные структуры, что приводит к улучшению адгезионных свойств. Эти свойства обеспечивают

молекулярную когезию, которая является основой для механической прочности композиционной системы. В рамках данного исследования анализируется влияние концентрации связующих веществ, изготовленных на основе полисиликатов натрия различной модульности, как и вне композиции, так и внутри композиционной матрицы, на их адгезивные свойства.

Теоретически можно предположить, что полисиликатные связки, синтезированные в композиционной среде, будут обладать более высокими клеящими свойствами по сравнению с аналогичными материалами, синтезированными вне её. Это предположение основано на научной концепции, изложенной, которая описывает синергетические эффекты, возникающие при синтезе наночастиц в условиях композиционной матрицы. В лабораторных условиях были разработаны материалы, основу которых составили тонкомолотый огнеупорный шамот и полисиликаты натрия с различной модульностью: 6, 8, 10 и 15. Полисиликаты натрия были получены методом гидролиза безводного силиката натрия. В процессе реакции он взаимодействовал с 30%-ным водным раствором гидрозоля диоксида кремния при температуре от 70 до 100°C. Выдержка смеси не превышала 0,5 часа, что обеспечило оптимальные условия для формирования полисиликатных структур.

В ходе эксперимента были разработаны композиционные смеси с использованием высокоскоростного смешивания в миксере. Основные компоненты включали тонкоизмельченный огнеупорный шамот, безводный силикат натрия (Na_2SiO_3) и кремнезоль (золь кремниевой кислоты). Эти ингредиенты были выбраны на основе рецептуры, которая обеспечивала синтез полисиликатов натрия напрямую в композиционной среде без дополнительных этапов обработки. Для определения необходимого количества кремнезоля с концентрацией 70:30 и плотностью 1,2 г/см³ использовались данные из табл. 1.

Таблица 1. Расчетные данные расхода кремнезоля (концентрации – 70:30) для получения полисиликатов натрия разного модуля из безводного силиката натрия, M=2,9.

Table 1. Calculated data on silica sol consumption (concentration – 70:30) for obtaining sodium polysilicates of different modulus from anhydrous sodium silicate, M=2.9.

Компоненты поли- силиката натрия / Sodium polysilicate components	Ед. изм. / Unit	Силикатный модуль / Silicate modulus					
		2.9	4.0	6.0	8.0	10.0	15.0
БСН	г	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Кремнезоль	г	-	2394.8	3592.2	4789.6	5987.0	8980.0

Экспериментальная цель заключалась в получении полисиликатов натрия с различными модульными композициями, начиная с безводного силиката натрия с модулем (M), равным 2,9. Модульная композиция полисиликатов натрия определяется как отношение кремнезема к оксиду натрия и является ключевым параметром для контроля физико-химических свойств синтезируемых материалов. Применение высокоскоростного перемешивания и тщательно подобранных компонентов позволило успешно синтезировать полисиликаты натрия непосредственно в композиционной среде. Это открывает новые перспективы для оптимизации технологических процессов в области материаловедения и высокотемпературной керамики.

В ходе исследования проанализированы связки, изготовленные из полисиликатов натрия. Эти материалы могли быть получены как самостоятельно, так и в составе композиционных смесей. Для проведения работы использовались молотый безводный силикат натрия и кремнезоль. Для оценки прочности адгезионного соединения огнеупорных связок был проведен сравнительный анализ показателей изгиба (Ризг) образцов-балочек размером 11х6,5х5,4. Образцы, изготовленные из огнеупорного кирпича, были скреплены с помощью исследуемых связующих материалов. Перед нанесением клеящей смеси торцевые поверхности образцов подвергались тщательной обработке методом сухого трения. Это выполнено для увеличения площади контакта между материалами и минимизации дефектов поверхности.

В процессе исследования было создано композиционное связующее на основе поли- силикатов натрия и тонкодисперсного шамота. Это вещество эффективно заполняет поры на границе контакта между образцами, формируя прочные клеевые соединения даже в огра- ниченных пространствах. Концентрация связующего в клеевом шве изменялась от непол- ного заполнения до формирования толстого слоя, что позволило изучить, как этот параметр влияет на механические характеристики соединения.

После нанесения клеевого состава, образцы-балочки устанавливались вертикально в условия, обеспечивающие их естественную сушку. Процесс сушки проводился в строгом соответствии с заданным температурным режимом: начальная стадия включала постепен- ный подъем температуры до 90 °С и последующую выдержку в течение 3 часов. Для обес- печения полной гидратации и растворения мельчайших частиц безводного силиката натрия в жидком кремнезоле был выбран определенный температурный интервал. Это способство- вало формированию полисиликатного соединения в шве между склеенными образцами. Затем, чтобы достичь максимальной прочности и долговечности клеевого шва, температуру повысили до 200 °С. Этот этап термообработки инициировал процессы дальнейшего струк- турирования и упрочнения соединения. В результате улучшились его физико-механические характеристики, такие как устойчивость к термическим и механическим воздействиям, характерным для эксплуатации в условиях высоких температур и агрессивных сред. После завершения формирования клеевого соединения образцы охлаждались в печи до комнатной температуры. Затем проводились испытания на изгиб, результаты которых были зафиксир- ованы в табл. 2 и 3.

Полученные данные демонстрируют высокую прочность клеевых соединений, что подтверждает эффективность разработанной методики и перспективность использова- ния полисиликатов натрия в качестве связующего вещества для формирования прочных и надежных клеевых швов в условиях стесненного пространства.

Таблица 2. Механическая прочность на изгиб (R из, МПа) склеенных образцов с полисиликатной связкой, изготовленных вне композиции
Table 2. Mechanical bending strength (R , MPa) of glued samples with a polysilicate binder, made outside the composition.

Концентрация связки, г/см ² / Binder concentration, g/cm ²	Мольное отношение (SiO ₂ /Na ₂ O) / Mole ratio (SiO ₂ /Na ₂ O)				
	4,0	6,0	8,0	10,0	15,0
0,057	1,6	1,3	1,1	1,0	0,28
0,14	2,5	2,3	2,1	2,0	0,43
0,2	2,8	2,65	2,5	2,4	0,55
0,28	3,0	2,8	2,7	2,5	0,6
0,43	2,0	1,9	1,8	1,7	0,37

Таблица 3. Прочность на изгиб (Rиз, МПа) образцов, изготовленных с использованием связки на основе полисиликатов натрия в составе композиции /

Table 3. Bending strength (Ris, MPa) of samples manufactured using a binder based on sodium polysilicates in the composition

Концентрация связки, г/см ² / Binder concentration, g/cm ²	Мольное отношение (SiO ₂ /Na ₂ O) / Mole ratio (SiO ₂ /Na ₂ O)				
	4,0	6,0	8,0	10,0	15,0
0,057	2,4	2,0	1,8	1,9	0,4
0,14	3,2	3,0	2,8	2,85	0,6
0,2	3,4	3,2	3,0	2,9	0,55
0,28	3,2	3,0	2,9	2,7	0,5
0,43	2,5	2,3	2,1	2,0	0,45

Анализ данных, представленных в табл.2 и 3, выявил ключевые параметры, влияю- щие на формирование равнопрочных клеевых соединений при использовании полисилика- тов натрия в составе композиционных материалов. Прочность (Rиз, МПа) образцов, под- вергшихся процессу склеивания с использованием связки на основе полисиликатов натрия, полученных в рамках композиционного синтеза, представляет собой ключевой параметр,

подлежащий тщательному анализу. Данный аспект исследования имеет фундаментальное значение для понимания физико-химических характеристик и эксплуатационных свойств получаемых материалов.

Вывод. В рамках данной работы было проведено комплексное изучение прочностных характеристик образцов, подвергшихся процессу склеивания, сфокусированное на оценке их способности выдерживать механические нагрузки в условиях различных внешних воздействий. Исследование выявило значительное влияние состава и структуры связующего компонента на прочностные характеристики композиционных материалов. Это открытие создает новые возможности для улучшения технологических процессов и повышения качества готовой продукции.

Установлено, что оптимальная концентрация полисиликатной связки для достижения высокой прочности клеевого шва и монолитной контактной зоны составляет 0,14–0,2 г/см² при получении полисиликатов непосредственно в композиции. В случае использования полисиликатов, синтезированных вне композиции, рекомендуемая концентрация возрастает до 0,2–0,28 г/см², что свидетельствует о значительном влиянии условий синтеза на физико-механические свойства клеевого соединения.

Различия в концентрациях полисиликатной связки подчёркивают важность комплексного подхода к исследованию факторов, влияющих на прочность клеевого соединения. Помимо относительного содержания полисиликатной композиции, такие параметры, как плотность клеевого соединения и адсорбционные свойства, оказывают существенное влияние на прочность шва и зоны склеивания. Адгезионная способность, в свою очередь, напрямую зависит от специфических условий синтеза полисиликатов натрия, а также от метода их интеграции в композиционный материал.

Экспериментальные данные показывают, что образцы, склеенные с применением полисиликатов, синтезированных отдельно от композиционной основы, подвержены разрушению в зоне адгезива. Это свидетельствует о недостаточной адгезионной прочности при использовании полисиликатов, не интегрированных на этапе синтеза в композиционную структуру. Таким образом, подчёркивается важность строгого контроля параметров синтеза и добавления полисиликатов для достижения максимальной адгезионной прочности и долговечности клеевых соединений.

Результаты исследования показывают, что силикатный модуль оказывает значительное влияние на адгезивные свойства связки, изготовленной с использованием полисиликатов натрия. Если значение силикатного модуля превышает 10, прочность связки резко снижается, независимо от концентрации полисиликатов, методов их получения и условий эксплуатации. Этот эффект проявляется как в простых системах, так и в сложных композициях, состоящих из нескольких компонентов.

Разработка жаростойких композиционных вяжущих и бетонов на основе полисиликатов натрия с высоким модулем силикатной структуры и сниженным содержанием легкоплавкого компонента Na₂O является перспективным направлением научных исследований. Эти материалы обладают улучшенными огнеупорными и термомеханическими характеристиками, что делает их важными для применения в условиях высоких температур. Для дальнейших исследований по созданию полисиликатнатриевых композиционных вяжущих рекомендуется использовать полисиликат натрия с модулем силикатной структуры не более 10. Такой подход позволит оптимизировать физико-химические свойства вяжущих материалов, повысить их эксплуатационные характеристики при тепловом воздействии и обеспечить высокую надежность и долговечность композиционных систем.

Применение полисиликатов натрия с контролируемым модулем силикатной структуры является результатом тщательного анализа и оптимизации их структуры. Это позволяет целенаправленно регулировать термическую устойчивость и механические свойства композитов, что является ключевым фактором их практического применения. Интеграция современных научных достижений в области материаловедения значительно расширяет возможности создания высокоэффективных жаростойких материалов, что имеет важное

значение для развития различных отраслей промышленности, включая металлургию, энергетику и строительство.

Библиографический список:

1. Nanotechnology in Construction / Edited by Y. de Miguel, A. Porro and P.J.M. Bartos. — 2006. — 416 p. - Режимдоступажурн.:<http://www.rilem.net/proContents.php?pro=pro045>.
2. Nanotechnology in Construction 3 / [ZdenekBittnar, Peter J.M. Bartos, JfriN"eme"cek, VitSmilauer, Jan Zeman (Eds.)] // Proceedings of the NICOM3 ABC: Springer, 31 may- 2 june, 2009. — 432 p.
3. Войтович В.А. Нанонаука, нанотехнологии, строительные наноматериалы / Войтович В.А. Режимдоступажурн. :<http://interlibrary.narod.ru/GenCat/GenCat.Scient.Dep/GenCatArch>). Нанотехнологии. Азбука для всех / ред. Ю.Д. Третьякова. – М.: Физмат- лит,2008.– 368 с.
4. Lam T.Q.K., Do T.M.D., Ngo V.T., Nguyen T.C. Increased plasticity of nano concrete with steel fibers // Magazine of Civil Engineering. 2020. № 1 (93). С. 27-34
5. Chong, K.P., 'Nanotechnology in Civil Engineering -Research and Challenge', in 'Nanotechnology in Construction', P.J.M. Bartos et al. Eds. (Royal Society ofChemistry, 2004 - ISBN 0-85404-632-2) 13-22.
6. Masens, C., 'The Nanohouse - an Australian initiative todevelop the home of the future', in 'Nanotechnology in Construction', P.J.M. Bartos et aL Eds. (Royal Society of Chemistry, 2004 - ISBN 0-85404-632-2) 331-342.
7. Makar, J, 'Implication of nanotechnology for the construction industry', Internal report, IRC, National Research Council Canada, January 2002.
8. Institute for Research in Construction, 'New IRC research project applies nanotechnology to construction materials', Construction Innovation 7 (4) (2002).
9. Lam T.Q.K., Do T.M.D., Ngo V.T., Nguyen T.C. Increased plasticity of nano concrete with steel fibers // Magazine of Civil Engineering. 2020. № 1 (93). С. 27-34
10. Корнеев В.И., Данилов В.В. Растворимое и жидкое стекло. - Санкт-Петербург; СПб.: Стройиздат, 1996, С. 216
11. Айлер Р. Химия кремнезема: растворимость, полимеризация, коллоидные и поверхностные свойства, биохимия: Пер. с англ.- М.: Мир, 1982. Ч 1. С. 416.
12. Брыков А.С. Силикатные растворы и их применение // Учебное пособие. - Санкт-Петербург; СПбГТИ (ТУ). 2009. С. 54.
13. Шабанова Н.А., Саркисов П.Д. Основы золь-гель технологии нанодисперсного кремнезема. М.: «Академкнига». 2004. С. 208.
14. Пестерников Г.Н., Максютин А.С., Пучков С.П., Обухова В.Б. Способ получения полисиликатов натрия (варианты) // Патент России №2124475. 1999. Бюл. № 1.
15. Тотурбиев А.Б. Жаростойкое композиционное вяжущее на полисиликатах натрия // Бетон и железобетон. № 3. 2012. С.5-8.
16. Тотурбиев А.Б., Строкова В.В., Мусаджиев Н.Б. Высокоогнеупорный жаростойкий бетон на нанодисперсном связующем. // Промышленное и гражданское строительство. № 1 2014. С.75-77
17. Тотурбиев Б.Д. Строительные материалы на основе силикат-натриевых композиций. М.: Стройиздат. 1988. С. 208.
18. Тотурбиев Б.Д., А.Б. Тотурбиев. Теоретические и экспериментальные основы получения жаростойких бетонов из нанодисперсного полисиликата натрия // Бетон и железобетон. - № 1. 2014. С. 2-6.
19. Рыжков И.В., Толстой В.С..Физико-химические основы формирования свойств смесей с жидким стеклом. -Изд.Харьковского университета. 1975.-136 с.
20. Тотурбиев А. Б., Тотурбиев Б. Дж. Исследования физико-хифизико-химических свойств жаростойкого полисиликатного натриевого композиционного вяжущего // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2024. Т. 18. № 4. С. 11- 18.
21. Тотурбиев Б. Дж. Физико-химические исследования композиционного вяжущего на основе боксита и полисиликата натрия // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2024. Т. 18. № 4. С. 19-25.

References:

1. Nanotechnology in Construction / Edited by Y. de Miguel, A. Porro and P.J.M. Bartos. 2006; 416 p. - Journal Access Mode: <http://www.rilem.net/proContents.php?pro=pro045>.
2. Nanotechnology in Construction 3 / [ZdenekBittnar, Peter J.M. Bartos, JfriN"eme"cek, VitSmilauer, Jan Zeman (Eds.)] // Proceedings of the NICOM3 ABC: Springer, 31 May - 2 June, 2009;432 p.
3. Voytovich V.A. Nanoscience, Nanotechnology, Construction Nanomaterials / Voytovich V.A. Journal Access Mode. :<http://interlibrary.narod.ru/GenCat/GenCat.Scient.Dep/GenCatArch>). Nanotechnology. ABC for everyone / ed. Yu.D. Tretyakova. - Moscow: Fizmatlit, 2008; 368 p.
4. Lam T.Q.K., Do T.M.D., Ngo V.T., Nguyen T.C. Increased plasticity of nano concrete with steel fibers. *Magazine of Civil Engineering*. 2020;1(93):27-34

5. Chong, K.P., 'Nanotechnology in Civil Engineering - Research and Challenge', in 'Nanotechnology in Construction', P.J.M. Bartos et al. Eds. (Royal Society of Chemistry, 2004 - ISBN 0-85404-632-2) 13-22.
6. Masens, C., 'The Nanohouse - an Australian initiative to develop the home of the future', in 'Nanotechnology in Construction', P.J.M. Bartos et al. Eds. (Royal Society of Chemistry, 2004 - ISBN 0-85404-632-2) 331-342.
7. Makar, J., 'Implication of nanotechnology for the construction industry', Internal report, IRC, National Research Council Canada, January 2002.
8. Institute for Research in Construction, 'New IRC research project applies nanotechnology to construction materials', Construction Innovation 2002 7(4).
9. Lam T.Q.K., Do T.M.D., Ngo V.T., Nguyen T.C. Increased plasticity of nano concrete with steel fibers. *Magazine of Civil Engineering*. 2020; (93):27-34
10. Korneev V.I., Danilov V.V. Soluble and liquid glass. - St. Petersburg; SPb.: Stroyizdat, 1996;216
11. Eiler R. Silica chemistry: solubility, polymerization, colloidal and surface properties, biochemistry: Trans. from English. - Moscow: Mir, 1982; 1: 416.
12. Brykov A.S. Silicate solutions and their application. *Study guide*. - St. Petersburg; SPbGTI (TU). 2009;54.
13. Shabanova N.A., Sarkisov P.D. Fundamentals of sol-gel technology of nanodispersed silica. M.: "Akademkniga". 2004;208.
14. Pesternikov G.N., Maksyutin A.S., Puchkov S.P., Obukhova V.B. Method for producing sodium polysilicates (variants). Russian Patent No. 2124475. 1999. Bull. No. 1.
15. Toturbiev A.B. Heat-resistant composite binder based on sodium polysilicates. *Concrete and reinforced concrete*. 2012;3:5-8.
16. Toturbiev A.B., Strokova V.V., Musadzhiev N.B. Highly Refractory Heat-Resistant Concrete with a Nano-Dispersed Binder. *Industrial and Civil Engineering*. 2014;1:75-77
17. Toturbiev, B.D. Construction Materials Based on Sodium Silicate Compositions. Moscow: Stroyizdat. 1988; 208.
18. Toturbiev, B.D., A.B. Toturbiev. Theoretical and Experimental Principles of Obtaining Heat-Resistant Concretes from Nano-Dispersed Sodium Polysilicate. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2014;1: 2-6.
19. Ryzhkov, I.V., Tolstoy, V.S. Physicochemical Principles of Forming the Properties of Mixtures with Liquid Glass. Kharkiv University Press. 1975;36 p.
20. Toturbiev A. B., Toturbiev B. Dzh. Studies of the physicochemical and chemical properties of a heat-resistant sodium polysilicate composite binder. *Bulletin of the Dagestan State Pedagogical University. Natural and Exact Sciences*. 2024; 18(4):11-18.
21. Toturbiev B. Dzh. Physicochemical studies of a composite binder based on bauxite and sodium polysilicate *Bulletin of the Dagestan State Pedagogical University. Natural and Exact Sciences*. 2024;18(4):19-25.

Сведения об авторах:

Тотурбиев Батырбий Джакаевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологии и организации строительного производства, главный научный сотрудник Института Геологии ДФИЦ РАН; totbat@mail.ru.

Журавлев Михаил Михайлович, аспирант кафедры технологии и организации строительного производства; mmrd555@mail.ru

Тотурбиев Абдулазиз Адильбиевич, аспирант кафедры экономики и управления; totbat@mail.ru

Information about authors:

Batyrbiy Dzh. Toturbiev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Technology and Organization of Construction Production, Chief Researcher of the Institute of Geology of the Far Eastern Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; totbat@mail.ru.

Mikhail M. Zhuravlev, Postgraduate student, Department of Technology and Organization of Construction Production; mmrd555@mail.ru

Abdulaziz A. Toturbiev, Postgraduate student, Department of Economics and Management; totbat@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 10.08.2025.

Одобрена после рецензирования/Reviced 20.10.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 24.12. 2025.

**Исследование теплового режима в классе общеобразовательной школы
при различных вариантах тепловой защиты наружной стены**

А.А. Фролова¹, Д.Ф. Карпов², Х.М. Вафаева³, А.С. Воронов⁴

¹Московский государственный строительный университет,

¹129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Россия,

²Вологодский государственный университет,

²160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15, Россия,

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

³195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29 литера Б, Россия,

⁴Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы,

⁴117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является анализ влияния различных значений сопротивления теплопередаче наружной стены помещения на величину результирующей температуры в различных точках помещения и сравнение полученных значений с нормативными требованиями. **Метод.** Применялись программный расчетный метод определения результирующей температуры в различных точках помещения, а также натурные измерения температуры внутреннего воздуха в исследуемом помещении. **Результат.** Получены графики изменения температуры внутреннего воздуха в различных точках помещения, а также распределения результирующей температуры, рассчитанные с использованием программы Ashar на различных высотах помещения при разных вариантах тепловой защиты наружной стены. **Вывод.** Выявленные закономерности изменения результирующей температуры при различных уровнях тепловой защиты наружной стены носят устойчивый характер и подтверждаются результатами натурных измерений. Примененный расчетно-экспериментальный подход - корректный и обоснованный инструмент для анализа теплового режима учебных помещений и оценки влияния конструктивных решений ограждающих конструкций на формирование параметров внутреннего микроклимата.

Ключевые слова: комфортность тепловой обстановки, результирующая температура, параметры внутреннего микроклимата, тепловая защита здания

Для цитирования: А.А. Фролова, Д.Ф. Карпов, Х.М. Вафаева, А.С. Воронов. Исследование теплового режима в классе общеобразовательной школы при различных вариантах тепловой защиты наружной стены. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(1):252-259. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-252-259.

**A Study of the thermal regime in a comprehensive school classroom with different options
for thermal protection of the external wall**

A.A. Frolova¹, D.F. Karpov², Kh.M. Vafaeva³, A.S. Voronov⁴

¹Moscow State University of Civil Engineering,

¹Yaroslavskoe Highway, 26, Moscow, 129337, Russia,

²Vologda State University,

²15 Lenin St., Vologda, 160000, Russia,

³Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,

³29 Letter B Polytechnique St., Saint Petersburg, 195251, Russia,

⁴Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba,

⁴6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russia

Abstract. Objective. The purpose of this study is to analyze the influence of different values of the thermal resistance of an external wall on the resultant temperature at various points within a room and to compare the obtained values with regulatory requirements. **Method.** A software calculation method was used to determine the resulting temperature at various points in the room, as well as in-kind measurements of the indoor air temperature in the room under study. **Result.** The research produced graphs illustrating variations in indoor air temperature at different points in the room, as well as distributions of the resultant temperature calculated using the Ashar software at various heights under different external wall thermal protection scenarios. **Conclusion.** The identified patterns of change in the resulting temperature at different levels of thermal protection of the external wall are consistent and are confirmed by the results of in-kind measurements. This allows us to consider the applied computational and experimental approach as a valid and justified tool for analyzing the thermal conditions of classrooms and assessing the impact of building envelope design on the formation of indoor microclimate parameters.

Keywords: thermal comfort, resulting temperature, internal microclimate parameters, building thermal protection

For citation: A.A. Frolova, D.F. Karpov, Kh.M. Vafaeva, A.S. Voronov. A Study of the thermal regime in a comprehensive school classroom with different options for thermal protection of the external wall. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):252-259. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-252-259.

Введение. На комфортное пребывание человека в помещении оказывает влияние ряд факторов и параметров внутреннего микроклимата [1-3]. К таким параметрам относятся температура, относительная влажность, подвижность воздуха, а также результирующая температура внутреннего воздуха, которые в Российской Федерации нормируются для различных типов помещений в межгосударственном стандарте «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» [4]. Совокупность значений указанных параметров позволяет сформировать комплексную оценку комфортности внутренней среды [5-7]. Вместе с тем ряд ученых рассматривают параметры микроклимата изолированно, оценивая влияние отдельных факторов на тепловые ощущения человека в помещениях. Так, авторы [8-10] исследуют закономерности изменения тепловлажностных параметров воздуха в кухне-гостиной в условиях естественной и принудительной вытяжной вентиляции с использованием экспериментальных и расчетных методов.

Из нормативного документа [11] следует, что тепловая защита здания может быть рассчитана тремя способами: по санитарно-гигиеническим требованиям, по показателям энергосбережения и с учетом регионального коэффициента. Каждый из указанных подходов обладает определенными особенностями и не во всех случаях может быть применен для конкретных зданий. В рамках настоящего исследования данный аспект не рассматривается, поскольку основная задача заключается в анализе влияния различных уровней тепловой защиты наружной стены на формирование результирующей температуры внутреннего воздуха.

Согласно [4], результирующая температура помещения представляет собой комплексный показатель, учитывающий радиационную температуру ограждающих поверхностей и температуру воздуха, и нормируется для различных типов зданий и периодов года. При этом на практике данный показатель редко оценивается на соответствие нормативным требованиям, что обуславливает актуальность его дополнительного анализа.

Мировой опыт в области тепловой защиты зданий представлен в исследованиях [12-16], в которых рассматриваются современные подходы к повышению энергоэффективности, теплового комфорта и эксплуатационной устойчивости зданий в различных климатических и функциональных условиях. Представленные работы акцентируют внимание на комплексной реновации существующего фонда, включающей интеграцию мероприятий по конструктивному усилению и улучшению теплозащитных характеристик ограждающих конструкций. Существенное внимание уделяется влиянию тепловой защиты на здоровье

и комфорт пользователей, а также применению климатически адаптированных архитектурно-конструктивных решений. Показан высокий потенциал модернизации гражданских зданий, обеспечивающий снижение энергопотребления, тепловых нагрузок и углеродных выбросов при одновременном повышении качества внутренней среды.

Постановка задачи. Целью исследования является анализ влияния различных значений сопротивления теплопередаче наружной стены помещения на величину результирующей температуры в различных точках помещения и сравнение полученных значений с нормативными требованиями. Для достижения поставленной цели сформулированы задачи: провести натурные измерения температуры внутреннего воздуха в различных точках исследуемого помещения; расчетным методом с использованием программного обеспечения для персонального компьютера оценить распределение результирующей температуры по объему помещения, фиксируя полученные значения на различных высотах от уровня пола; проанализировать факторы, влияющие на формирование температуры внутреннего воздуха и результирующей температуры в исследуемом помещении.

Объектом исследования является учебный класс общеобразовательного учреждения в городе Москве. Предмет исследования - результирующая температура, формирующаяся в помещении при различных вариантах тепловой защиты здания.

Методы исследования. Для проведения исследования применялись расчетный метод с использованием программы Ashar [17] для определения результирующей температуры в различных точках помещения, а также натурные измерения температуры внутреннего воздуха в исследуемом помещении. Программа Ashar разработана для расчета радиационной температуры и локальной асимметрии радиационной температуры по площади и высоте помещения на уровнях 1,1 и 1,7 м от уровня пола.

Учебный класс имеет размеры в плане $6,1 \times 5,1$ м, высота помещения составляет 3,5 м, в помещении расположены два наружных окна. Сопротивления теплопередаче наружной стены приняты на следующих уровнях: вариант 1 – $R_{ст} = 2,93 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$; вариант 2 – $R_{ст} = 1,84 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$; вариант 3 – $R_{ст} = 1,26 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Сопротивление теплопередаче окон во всех вариантах $R_{ок} = 0,48 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Для определения температуры внутреннего воздуха в исследуемом помещении использовались логгеры температуры Testo 174 Н, модель которых внесена в Государственный реестр средств измерений (№ 47602-11) и допущена к применению на территории Российской Федерации. Для обработки результатов измерений использовалось бесплатное программное обеспечение ComSoft Basic. Встроенные сенсоры осуществляли непрерывные измерения с интервалом 5 мин при допустимой погрешности $\pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$. Расположение датчиков в помещении показано на рис. 1.

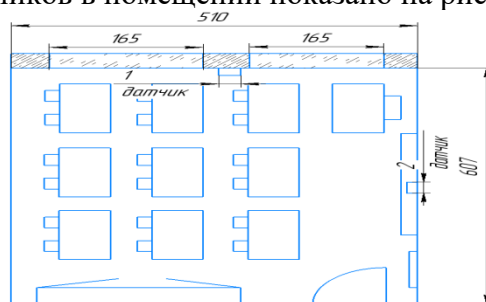


Рис. 1 – Расположение датчиков температуры Testo 174 Н в исследуемом учебном классе

Fig. 1 – Location of Testo 174 Н temperature sensors in the classroom under study

Обсуждение результатов. В результате проведенных натурных измерений получены графики изменения температуры внутреннего воздуха в различных точках помещения (рис. 2, 3), а также результаты расчета распределения результирующей температуры, выполненного расчетным методом с использованием программы Ashar, на различных высотах помещения при разных вариантах тепловой защиты наружной стены. На рис. 4-6 представлены результаты расчета для высоты 1,1 м от уровня пола для трех рассматриваемых вариантов тепловой защиты наружной стены. В программе Ashar расчет выполнялся

без учета внутренних теплопоступлений в помещении, при заданной наружной температуре $-1,7^{\circ}\text{C}$ и внутренней температуре воздуха 20°C . В ходе натурных измерений температура внутреннего воздуха фиксировалась с учетом присутствия людей в помещении, при этом наружная температура в течение периода измерений снижалась и в среднем составляла -5°C . На рис. 4-6 представлены поля изотерм результирующей температуры в помещении. С понижением температуры наблюдается увеличение кривизны изотерм в направлении оконных проемов, что свидетельствует о существенном влиянии светопрозрачных ограждающих конструкций на формирование температурного поля. Результаты натурных измерений температуры внутреннего воздуха подтверждают влияние оконных проемов на формирование пониженных температур в прилегающих зонах, что согласуется с данными, полученными расчетным методом, и отражается в виде локальных минимумов температуры на экспериментальных графиках. Установлено, что даже при нормируемых значениях сопротивления теплопередаче наружной стены в ряде точек помещения не обеспечивается соответствие требованиям по нормируемой температуре в рабочей зоне, что указывает на необходимость комплексной оценки тепловой защиты ограждающих конструкций с учетом светопрозрачных элементов и особенностей теплового режима помещения.



Рис. 2 – Значение температуры внутреннего воздуха в учебном классе по датчику № 1
 Fig. 2 – The indoor air temperature reading in the classroom according to sensor No. 1

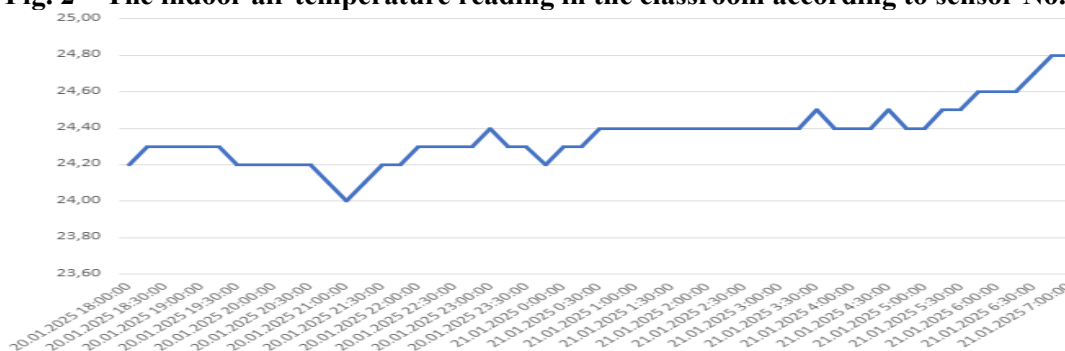


Рис. 3 – Значение температуры внутреннего воздуха в учебном классе по датчику № 2
 Fig. 3 – The indoor air temperature reading in the classroom according to sensor No. 2

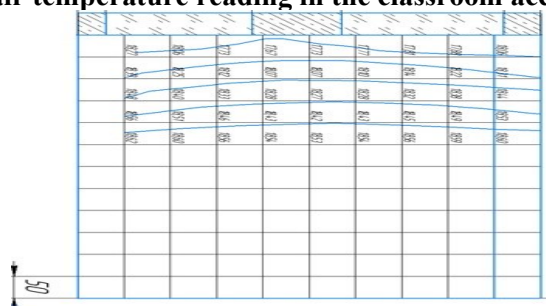


Рис. 4 – Значения результирующей температуры внутреннего воздуха в учебном классе на высоте 1,1 м. от пола при варианте 1 тепловой защиты здания
 Fig. 4 – Values of the resulting indoor air temperature in a classroom at a height of 1.1 m from the floor for option 1 of the building's thermal protection

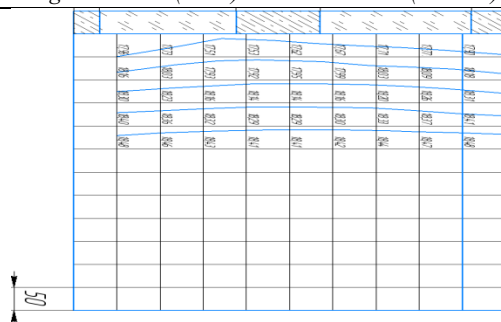


Рис. 5 – Значения результирующей температуры внутреннего воздуха в учебном классе на высоте 1,1 м. от пола при варианте 2 тепловой защиты здания

Fig. 5 – Values of the resulting indoor air temperature in a classroom at a height of 1.1 m from the floor for option 2 of the building's thermal protection

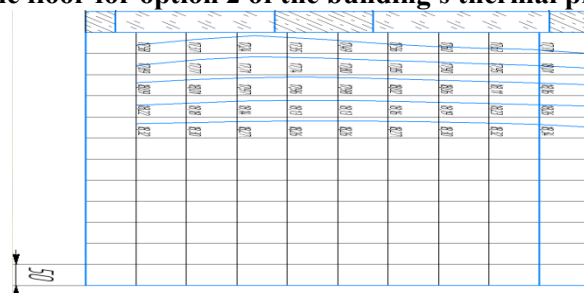


Рис. 6 – Значения результирующей температуры внутреннего воздуха в учебном классе на высоте 1,1 м. от пола при варианте 3 тепловой защиты здания

Fig. 6 – Values of the resulting indoor air temperature in a classroom at a height of 1.1 m from the floor for option 3 of the building's thermal protection

Вывод. Расхождения между расчетными и натурными значениями температуры обусловлены различиями в заданных граничных условиях, а также влиянием внутренних теплоступлений, не учитываемых в расчетной модели программы Ashar. Тем не менее, выявленные закономерности изменения результирующей температуры при различных уровнях тепловой защиты наружной стены носят устойчивый характер и подтверждаются результатами натурных измерений. Это позволяет рассматривать примененный расчетно-экспериментальный подход как корректный и обоснованный инструмент для анализа теплового режима учебных помещений и оценки влияния конструктивных решений ограждающих конструкций на формирование параметров внутреннего микроклимата.

Установлено, что на величину результирующей температуры существенное влияние оказывает светопрозрачная часть ограждающих конструкций – окна помещения. Вблизи оконных проемов формируются минимальные значения результирующей температуры. В исследуемом учебном классе в зоне воздействия окна располагаются рабочие места трех учащихся и преподавателя, что усиливает значимость выявленного температурного дискомфорта. Учебные столы размещены на расстоянии менее 500 мм от внутренней поверхности наружной стены, в результате чего рабочие места частично выходят за пределы нормативной рабочей зоны. Пребывание людей в зоне влияния окон, с точки зрения нормативных требований, является некомфортным и может оказывать неблагоприятное влияние на работоспособность и общее самочувствие.

Повышение сопротивления теплопередаче наружной стены приводит к более равномерному распределению результирующей температуры по объему помещения и снижению температурных градиентов в зонах примыкания ограждающих конструкций и светопрозрачных элементов [18].

Полученные результаты подтверждают целесообразность комплексного учета теплозащитных характеристик как наружных стен, так и оконных заполнений при проектировании и реконструкции учебных помещений с целью обеспечения нормативных параметров микроклимата в рабочей зоне [19-21]. Практическое применение результатов исследования возможно при обосновании проектных решений по тепловой защите ограждающих

конструкций общеобразовательных зданий, а также при корректировке планировочных решений, направленных на повышение теплового комфорта и улучшение санитарно-гигиенических условий пребывания обучающихся и преподавателей [22-25].

Библиографический список:

1. Bousiotis, Dimitrios and Sanghera, Dylan and Carrington, Jenny and Hodgkiss, Glyn and Jajarmi, Farzaneh and Rajab, Khalid and Pope, F. Parameterising the effect of human occupancy and kinetic energy on indoor air pollution // *Climate and Atmospheric Science*. 2026. Vol. 9. <https://doi.org/10.1038/s41612-025-01281-9>
2. Xu, Zhen. A Real-Time Precise Positioning Method for Indoor Robots Based on Multi-Sensor Fusion // *Journal of Social Science and Cultural Development*. 2026. Vol. 2. <https://doi.org/10.70767/jsscd.v2i9.829>
3. Zhang, Xueyan and Li, Rufe and Wang, Zhaoxuan and Li, Jing and Pan, Zichao and Wang, Jingkai and Zhang, Xingkuo. Relative risk and dalys assessment of indoor air pollutants in residential buildings - taking Dalian as an example // *BMC Public Health*. 2026. <https://doi.org/10.1186/s12889-025-26133-2>
4. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. Москва. Стандартинформ. 2019
5. Bayraktar, Arda and Ekici, Berk. Artificial intelligence for improving thermal comfort through envelope design in residential buildings: Recent developments and future directions // *Energy and Buildings*. 2026. P. 117007. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2026.117007>
6. Fedorczak-Cisak, Małgorzata and Radziszewska-Zielina, Elżbieta and Dechnik, Mirosław and Chowaniec, Aleksandra and Romanska-Zapala, Anna and Dudzińska, Anna. Comparative Study on Surface Heating Systems with and Without External Shading: Effects on Indoor Thermal Environment // *Energies*. 2025. Vol. 19. P. 223. <https://doi.org/10.3390/en19010223>
7. Vrusho, Borianana and Golgota, Alma and Dhoska, Klodian and Abotaleb, Mostafa. Improving energy efficiency strategy in residential buildings // *Jurnal Ilmiah Ilmu Terapan Universitas Jambi (JIITIJ)*. 2025. P. 380-392. <https://doi.org/10.22437/jiituj.v9i1.37924>
8. Маликова, О.Ю., Карпов, Д.Ф., Сазонова, Т.В. Исследование параметров внутреннего воздуха жилого здания при усовершенствовании системы вытяжной вентиляции // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2025. Т.52. №2. С.201-210. doi.org/10.21822/2073-6185-2025-52-2-201-210
9. Малявина Е.Г., Фролова, А.А., Ландырев, С.С. Распределение локальной асимметрии результирующей температуры по помещению // *Сантехника, Отопление, Кондиционирование*. 2021. № 10(238). С. 37-41
10. Корниенко, С.В. О возможности регулирования влажности воздуха в помещениях за счет правильного выбора строительных материалов и конструкций // *Энергосбережение*. 2025. № 1. С. 44-47
11. СП 50.13330.2024. Тепловая защита зданий. Актуализированная версия СНиП 23-02-2003. Москва. Стандартинформ. 2024
12. Jelena, Savic and Zorić, Andrija and Randelović, Dušan and Nedeljković, Miloš and Djuric Mijovic, Danijela. Retrofitting of Existing Residential Masonry Buildings Through Integrated Seismic and Energy Aspects: A Case Study of the City of Niš in Serbia // *Buildings*. 2025. Vol. 15. P. 3729. <https://doi.org/10.3390/buildings15203729>
13. Siewczynska, Monika and Rzeszut, Katarzyna and Kucz, Marlena. Factors Influencing the Health-Promoting Impact of Buildings // *Sustainability*. 2025. Vol. 17. P. 10304. <https://doi.org/10.3390/su172210304>
14. Kang, Yuan and Cang, Yingying and Zhang, Jingru and Zhou, Shiyuan. Assessment of Winter Indoor Humiture and Spatial Optimization of Rural Residential Buildings in Mengda National Nature Reserve, China // *Buildings*. 2025. Vol. 15. P. 1366. <https://doi.org/10.3390/buildings15081366>
15. Kareem, Humam and Kovács, Endre. Energy and cost savings in sustainable building walls: transient heat transfer simulation with PCM and TIM optimization // *Energy Conversion and Management X*. 2025. Vol. 28. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101227>
16. Liu, Sai and Chen, Gang and Li, Jian and Cao, Shi-Jie. Smart Skin for Zero Energy Buildings: A Review of Thermoresponsive Spectral-Adaptive Envelopes // *Advanced Materials*. 2025. Vol. 38. <https://doi.org/10.1002/adma.202511392>
17. Малявина, Е.Г., Фролова, А.А., Ландырев, С.С. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022615128. Программа для ЭВМ Ashar. № 2022613895, заявл. 17.03.2022. Оpubл. 29.03.2022
18. Rahmadyani, H and Felly, Rizka. Optimizing glass material and overhang performance in building envelopes through OTTV analysis to reduce building's thermal load // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2026. Vol. 1580. P. 012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1580/1/012022>
19. Krzemien, Leszek and Strojecki, Marcin. Window Bevel Shape Optimization for Sustainable Daylighting and Thermal Performance in Buildings. *Sustainability*. 2025;17:1111. <https://doi.org/10.3390/su17031111>
20. Šadauskienė, Jolanta and Ramanauskas, Juozas and Krawczyk, Dorota and Klumbytė, Eglė and Fokaides, Paris. Investigation of Thermal Bridges of a New High-Performance Window Installation Using 2-D and 3-D Methodology // *Buildings*. 2022. Vol. 12. P. 572. <https://doi.org/10.3390/buildings12050572>

21. Liu, Xin and Zhang, Nan and Wang, Zhongshuai and Gao, Weijun. Seasonal Effects of Window-to-Wall Ratio and Glazing Combinations on Office Building Performance in Qingdao // *Buildings*. 2025. Vol. 15. P. 3156. <https://doi.org/10.3390/buildings15173156>
22. Bridgette, Erica and Vidyarini, Etika and Wibisono, Andriyanto. Thermal Comfort and Adaptive Behaviour in a Naturally Ventilated Heritage School: A Field Study in a Tropical Highland Climate // *Eduvest - Journal of Universal Studies*. 2026. Vol. 6. P. 264-274. <https://doi.org/10.59188/eduvest.v6i1.51900>
23. Handayani, Agil and Rosyidah, Dyah and Sari, Ninda and Muhammad, Dzul Fikri and Rifai, Ridwan and Wulandari, Fadila. School Building's Thermal Comfort Analysis: A Community Service Implementation to Develop Comfortable Learning Environment // *Wikrama Parahita: Jurnal Pengabdian Masyarakat*. 2025. Vol. 9. P. 162-170. <https://doi.org/10.30656/jpmwp.v9i2.10781>
24. Rodríguez-González, Violeta and Barbero-Barrera, María del Mar. Energy Performance and Thermal Comfort in Madrid School Buildings Under Climate Change Scenarios. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. P. 9980. <https://doi.org/10.3390/app15189980>
25. Фролова, А.А., Карпов, Д.Ф., Вафаева, Х.М., Гаевская, З.А. Тепловизионное обследование общеобразовательных учреждений в г. Москве // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2025. Т.52. №1. С. 219-226. DOI.org/10.21822/2073-6185-2025-52-1-219-226

References:

1. Bousiotis, Dimitrios and Sanghera, Dylan and Carrington, Jenny and Hodgkiss, Glyn and Jajarmi, Farzaneh and Rajab, Khalid and Pope, F. Parameterising the effect of human occupancy and kinetic energy on indoor air pollution. *Climate and Atmospheric Science*. 2026; 9. <https://doi.org/10.1038/s41612-025-01281-9>
2. Xu, Zhen. A Real-Time Precise Positioning Method for Indoor Robots Based on Multi-Sensor Fusion. *Journal of Social Science and Cultural Development*. 2026; 2. <https://doi.org/10.70767/jsscd.v2i9.829>
3. Zhang, Xueyan and Li, Rufe and Wang, Zhaoxuan and Li, Jing and Pan, Zichao and Wang, Jingkai and Zhang, Xingkuo. Relative risk and dalys assessment of indoor air pollutants in residential buildings - taking Dalian as an example // *BMC Public Health*. 2026. <https://doi.org/10.1186/s12889-025-26133-2>
4. State Standard 30494-2011. Residential and Public Buildings. Indoor Microclimate Parameters. Moscow. *Standartinform*. 2019. (In Russ.)
5. Bayraktar, Arda and Ekici, Berk. Artificial intelligence for improving thermal comfort through envelope design in residential buildings: Recent developments and future directions. *Energy and Buildings*. 2026;. 117007. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2026.117007>
6. Fedorcak-Cisak, Małgorzata and Radziszewska-Zielina, Elżbieta and Dechnik, Mirosław and Chowaniec, Aleksandra and Romanska-Zapala, Anna and Dudzińska, Anna. Comparative Study on Surface Heating Systems with and Without External Shading: Effects on Indoor Thermal Environment. *Energies*. 2025;19:223. <https://doi.org/10.3390/en19010223>
7. Vrusho, Boriana and Golgota, Alma and Dhoska, Klodian and Abotaleb, Mostafa. Improving energy efficiency strategy in residential buildings. *Jurnal Ilmiah Ilmu Terapan Universitas Jambi (JIITUJ)*. 2025. P. 380-392. <https://doi.org/10.22437/jiituj.v9i1.37924>
8. Malikova, O.Y., Karpov, D.F., Sazonova, T.V. Investigation of internal air parameters in a residential building when improving the exhaust ventilation system. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2025;52(2):201-210. (In Russ.) <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2025-52-2-201-210>
9. Malyavina, E.G., Frolova, A.A., Landyrev, S.S. Distribution of Local Asymmetry of the Resultant Temperature within a Room // *Plumbing, Heating, Air Conditioning*. 2021;10 (238):37-41. (In Russ.)
10. Kornienko, S.V. On the Possibility of Regulating Indoor Air Humidity through the Proper Selection of Building Materials and Structures. *Energy Saving*. 2025;1:44-47. (In Russ.)
11. Code of Practice 50.13330.2024. Thermal Protection of Buildings. Updated Edition of Sanitary Rules and Regulations 23-02-2003. Moscow. *Standartinform*. 2024. (In Russ.)
12. Jelena, Savic and Zorić, Andrija and Randelović, Dušan and Nedeljković, Miloš and Djuric Mijovic, Danijela. Retrofitting of Existing Residential Masonry Buildings Through Integrated Seismic and Energy Aspects: A Case Study of the City of Niš in Serbia. *Buildings*. 2025;15:3729. <https://doi.org/10.3390/buildings15203729>
13. Siewczynska, Monika and Rzeszut, Katarzyna and Kucz, Marlena. Factors Influencing the Health-Promoting Impact of Buildings. *Sustainability*. 2025;17:10304. <https://doi.org/10.3390/su172210304>
14. Kang, Yuan and Cang, Yingying and Zhang, Jingru and Zhou, Shiyuan. Assessment of Winter Indoor Humiture and Spatial Optimization of Rural Residential Buildings in Mengda National Nature Reserve, China. *Buildings*. 2025;15:1366. <https://doi.org/10.3390/buildings15081366>
15. Kareem, Humam and Kovács, Endre. Energy and cost savings in sustainable building walls: transient heat transfer simulation with PCM and TIM optimization. *Energy Conversion and Management X*. 2025. Vol. 28. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101227>

16. Liu, Sai and Chen, Gang and Li, Jian and Cao, Shi-Jie. Smart Skin for Zero Energy Buildings: A Review of Thermoresponsive Spectral-Adaptive Envelopes. *Advanced Materials*. 2025;38. DOI.org/10.1002/adma.202511392
17. Malyavina, E.G., Frolova, A.A., Landyrev, S.S. Certificate of State Registration of Computer Program No. 2022615128. Computer Program Ashar. No. 2022613895, filed 17.03.2022. Publ. 29.03.2022. (In Russ)
18. Rahmadyani, H and Felly, Rizka. Optimizing glass material and overhang performance in building envelopes through OTTV analysis to reduce building's thermal load // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2026;1580:012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1580/1/012022>
19. Krzemien, Leszek and Strojecki, Marcin. Window Bevel Shape Optimization for Sustainable Daylighting and Thermal Performance in Buildings. *Sustainability*. 2025; 17:1111. DOI.org/10.3390/su17031111
20. Šadauskienė, Jolanta and Ramanauskas, Juozas and Krawczyk, Dorota and Klumbytė, Eglė and Fokaides, Paris. Investigation of Thermal Bridges of a New High-Performance Window Installation Using 2-D and 3-D Methodology. *Buildings*. 2022;12:572. <https://doi.org/10.3390/buildings12050572>
21. Liu, Xin and Zhang, Nan and Wang, Zhongshuai and Gao, Weijun. Seasonal Effects of Window-to-Wall Ratio and Glazing Combinations on Office Building Performance in Qingdao // *Buildings*. 2025. Vol. 15. P. 3156. <https://doi.org/10.3390/buildings15173156>
22. Bridgette, Erica and Vidyarani, Etika and Wibisono, Andriyanto. Thermal Comfort and Adaptive Behaviour in a Naturally Ventilated Heritage School: A Field Study in a Tropical Highland Climate // *Eduvest - Journal of Universal Studies*. 2026;6:264-274. <https://doi.org/10.59188/eduvest.v6i1.51900>
23. Handayani, Agil and Rosyidah, Dyah and Sari, Ninda and Muhammad, Dzul Fikri and Rifai, Ridwan and Wulandari, Fadila. School Building's Thermal Comfort Analysis: A Community Service Implementation to Develop Comfortable Learning Environment. *Wikrama Parahita: Jurnal Pengabdian Masyarakat*. 2025;9: 162-170. <https://doi.org/10.30656/jpmwp.v9i2.10781>
24. Rodríguez-González, Violeta and Barbero-Barrera, María del Mar. Energy Performance and Thermal Comfort in Madrid School Buildings Under Climate Change Scenarios. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. P. 9980. <https://doi.org/10.3390/app15189980>
25. Frolova, A.A., Karpov, D.F., Vafaeva, Kh.M., Gaevskaya, Z.A. Thermal imaging survey of general education institutions in Moscow. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2025;52(1):219-226. DOI.org/10.21822/2073-6185-2025-52-1-219-226

Сведения об авторах:

Фролова Анастасия Анатольевна, кандидат технических наук, доцент, доцент, кафедра теплогазоснабжения и вентиляции; FrolovaAA@mgsu.ru; ORCID 0000-0002-7802-8981

Карпов Денис Федорович, старший преподаватель, кафедра теплогазоснабжения; karpovdf@vogu35.ru; ORCID 0000-0002-3522-9302

Вафаева Христина Максудовна, кандидат технических наук, научный сотрудник; vafaeva.khm@gmail.com; ORCID 0000-0002-7422-5494

Воронов Александр Сергеевич, аспирант; 1142220725@rudn.ru; ORCID 0000-0001-6732-4155

Information about authors:

Anastasiya A. Frolova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Ventilation and Heat and Gas Supply; FrolovaAA@mgsu.ru; ORCID 0000-0002-7802-8981

Denis F. Karpov, Senior Lecturer, Department of Heat, Gas and Water Supply; karpovdf@vogu35.ru; ORCID 0000-0002-3522-9302

Khristina M. Vafaeva, Cand. Sci. (Eng.), Scientific Associate; vafaeva.khm@gmail.com; ORCID 0000-0002-7422-5494

Alexander S. Voronov, PhD student; 1142220725@rudn.ru; ORCID 0000-0001-6732-4155

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 10.08.2025.

Одобрена после рецензирования/Reviced 20.09.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 04.12. 2025.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Верстка журнала осуществляется с электронных копий. Используется компьютерная обработка штриховых и полутонных (в градациях серого) рисунков. Журнал изготавливается по технологии офсетной печати. В редакцию журнала необходимо представить: распечатку рукописи (1 экз.); распечатка должна представлять собой письменную копию файла статьи; электронную копию (допустима передача по электронной почте); метаданные авторов: ФИО, место работы, ученое звание, должность (1 экз.);

Правила оформления текста

Текст подготавливается в текстовом редакторе Microsoft Word. Статья должна предусматривать разделы: «Введение», «Постановка задачи», «Методы исследования», «Обсуждение результатов», «Вывод». Объем непосредственно содержания статьи должен составлять не менее 9-10 страниц машинописного текста. Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул Microsoft Word или в редакторе MathType. Шрифтовое начертание обозначений в формулах, в таблицах и в основном тексте должно быть полностью идентичным. Ссылки на формулы и таблицы даются в круглых скобках, ссылки на использованные источники (литературу) – в квадратных скобках. Формат бумаги А4. Параметры страницы: поля – левое 3 см, верхнее и нижнее 2 см, правое 1,5 см; колонтитулы отсутствуют.

Элементы заглавия публикуемого материала

УДК; Перечень авторов (разделяется запятыми, инициалы после фамилий, на русском и английском языке); выравнивание по центру. Название статьи (на русском и английском языке). Резюме (Abstract) – 200-250 слов, характеризующих содержание статьи (на русском и английском языке). Ключевые слова (keywords) 5-10 слов или словосочетаний, отражающих содержание статьи (на русском и английском языке). Каждый элемент заглавия приводится, начиная с новой строки; выравнивание проводится по центру. **Основной текст** Шрифт TimesNewRoman 12 pt, выравнивание по ширине, первая строка с отступом 1,25 см, межстрочный интервал – 1.

Библиографический список

В статье указывается строка с текстом «**Библиографический список**». Библиографический список на русском языке выполняется по ГОСТ Р 7.0.5 -2008. Библиографический список должен составлять не менее 15 наименований источников литературы, среди которых от 30-70 % ссылок на иностранные источники. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Обязательно цитирование современных работ, изданных по тематике статьи за последние 5 лет. Доля ссылок на статьи авторов рукописи, изданных ранее, не должна превышать 20% от общего количества ссылок. Библиографический список обязательно должен быть переведен на английский язык. «References» должен быть составлен по стандарту «Ванкувер». Ссылки на материалы, размещенные на электронных носителях, следует допускать в крайнем случае. Редакция оставляет за собой право потребовать от автора замены ссылки, если на момент обработки статьи по указанному адресу материал будет отсутствовать.

Справка об авторах

Включает для каждого автора фамилию, имя, отчество (полностью), ученую или академическую степень, ученое звание, ORCID, название и полный адрес места работы. Обязательно указывается адрес электронной почты. Сведения представляются на русском и английском языках.

Верстка формул, рисунков, таблиц

Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул Microsoft Word или в редакторе MathType; нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи; использование при нумерации букв и других символов не допускается. Выписанные в отдельную строку формулы выравниваются по середине строки, номер заключается в круглые скобки и выравнивается по правому краю текста. Все впервые встречающиеся в формуле обозначения должны быть расшифрованы сразу после формулы. Рисунки, представляющие собой графики, схемы и т. п., должны быть выполнены в графических векторных редакторах (встроенный редактор Microsoft Word, CorelDraw, Microsoft Visio и т. п.). Использование точечных форматов (.bmp, .jpeg, .tif, .html) допустимо только для рисунков, представление которых в векторных форматах невозможно (фотографии, копии экрана монитора и т. п.). Название рисунка указывается на русском и английском языках. Таблица состоит из следующих элементов: нумерационного заголовка (слова «Таблица» и ее номера арабскими цифрами); шапки (заголовочной части), включающей заголовок графа (объясняют значение данных в графах); боковика (первой строки графа) и прографики. Название таблицы указывается на русском и английском языках.

Требования к рецензированию и хранению рецензий научных статей, поступивших в редакцию журнала

Научная статья, поступившая в редакцию журнала, рассматривается ответственным редактором на соответствие тематике и направлениям журнала, правилам оформления и наличие сопроводительных документов. Редакция осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. Рецензии хранятся в редакции издания в течение 5 лет. При поступлении соответствующего запроса редакция вправе направлять копии рецензий в Министерство науки и высшего образования РФ.

План-график издания журнала

Выпуск 1 (март) – прием статей до 31 декабря предыдущего года; Выпуск 2 (июнь) – прием статей до 31 марта текущего года; Выпуск 3 (сентябрь) – прием статей до 30 июня текущего года; Выпуск 4 (декабрь) – прием статей до 30 сентября текущего года. Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи. Статьи, не отвечающие правилам оформления, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются. Датой поступления считается день получения редакцией окончательного текста статьи. Адрес редакционного совета: 367015, РД, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «ДГТУ», Учебно-лекционный корпус 2, редакция журнала «Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки». Технические вопросы можно выяснить по электронному адресу: aidasetova@rambler.ru и по телефону 8(8722)62-39-64, +79280504268

FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS

Electronic copies are used when laying out the journal. Computer processing is used for line and halftone (grayscale) graphics. The journal is produced by offset printing technology. Therefore, the following should be submitted to the editor: a printout of the manuscript (2 copies); the printout should be a hard copy of the electronic article file; electronic copy (e-mail is acceptable); an expert opinion supporting the article's suitability for publication (1 copy); Information about authors: Name, place of work, academic rank, position.

Guidance for the preparation of texts

The text should be prepared in Microsoft Word. The article must include sections entitled: "**Introduction**", "**Background**", "**Methods**", "**Results and Discussion**", "**Conclusion**". The article itself is supposed to comprise at least 9-10 if typewritten pages. Formulae should be prepared in Microsoft Word's built-in equation editor or MathType. Font symbols used in formulae, tables and in the main text must be completely identical. References to formulae and tables are given in round brackets; references to the sources referred to (literature) – in square brackets. Paper size – A4. Page setup: margins – left 3 cm, top and bottom – 2 cm, right – 1.5 cm; no headers or footers. **Elements of the title of the published material** UDC / LBC; List of authors (separated by commas; initials after surnames; in Russian and English); alignment *right*. Title of the article (in Russian and English). Abstract – 200-250 words or characters describing the content of the article (in Russian and English). Keywords – 5-10 words or phrases that reflect the content of the article (in Russian and English). Each title element should start on a new line; aligned centre. **Body text**. Font TimesNewRoman 12 pt, full justification, first line with 1.25 cm indentation, line spacing – 1.

Bibliography

The bibliography list should be entitled References. References in Russian prepared according to GOST R 7.0.5 -2008. The reference list is considered to include at least 20 names of literature sources, including 30-70% of references to foreign sources. References to unpublished works are not permitted. Only recent works on the subject of the article published within the past 5 years should be cited. The proportion of references to articles previously published by the authors should not exceed 20% of the total number of references. The bibliography must be translated into English. "References" should be drawn up according to the "Vancouver" standard. Please indicate your chosen standard when formulating the bibliography. Links to material on electronic media shall be allowed as a last resort. The editors reserve the right to require a replacement reference from the author if an item is absent at a specified address at the time of processing of the article.

Information about authors

For each author, the following information should be provided: first name, middle name (or patronymic) and last name, scientific or academic degree, academic title, brief academic biography (no more than 5-6 lines), name and full address of place of work. The specification of an email address is mandatory.

Composition of formulas. Layout of figures. Layout of tables

Formulas should be prepared in the built Microsoft Word equation editor or MathType Editor; only those formulas that are referenced in the text should be numbered; the use of letters or other characters is not permitted when enumerating equations. Formulas written out on a separate line are aligned to the middle of the line; their respective numbers shall be in parentheses and right-aligned. All symbols occurring in the formula for the first time must be decoded immediately after the formula.

Drawings, consisting of graphs, charts, etc. should be prepared in graphic vector editors (the internal editor of Microsoft Word, CorelDraw, Microsoft Visio etc.). The use of bitmap formats (.bmp, .jpeg, .tif) is only permissible for graphics whose presentation is not possible in vector formats (photos, screenshots, etc.).

A table should consist of the following elements: numerical title (the word "Table" and its number in Arabic numerals); title (header section) including column headings (explaining the meaning of the data in the columns); side heading (the first column on the left) and the table body (the other columns of the table).

Reviewing requirements for and saving of scientific article reviews, received by the journal editorial staff

A scientific article received by the editorial office is considered by the responsible editor in terms of its compliance with topics and directions of the magazine, formatting guidelines and availability of supporting documents. The editorial staff carries out a review of all incoming materials to the editor with a view to peer review. All reviewers are acknowledged experts on the topic of the peer-reviewed material. Reviews are stored at the editorial office for 5 years. On receipt of a proper request, editorial staff have the right to submit copies of reviews to the RF Ministry of Education and Science.

Publication schedule

Issue 1 (March) – articles accepted until 31 December of the previous year; Issue 2 (June) – articles accepted until March 31 of the present year; Issue 3 (September) – articles accepted until 30 June of the present year; Issue 4 (December) – articles accepted until September 30 of the present year; The Editorial Board reserves the right to make editorial changes which do not distort the main content of the article. Articles that do not conform to formatting guidelines will not be taken into consideration. Manuscripts and electronic media will not be returned. The date of acceptance shall be deemed to be the date of receipt of the final text by the editorial board. Address of the editorial board: 70 Imama Shamil'ya Ave., Makhachkala 367026, Daghestan, Russia. Daghestan State Technical University, Tutorial-Lecture Building 2, Editorial Board «Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences». Technical questions can be clarified by e-mail: aidasetova@rambler.ru or by telephone 8 (8722) 62-39-64; +79280504268.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation



**ВЕСТНИК
ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**
Махачкала, Том 53– №1 – 2026.

**HERALD
OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES**
Makhachkala, Volume 53, No.1. 2026.

**Верстка: Красикова А.В., Попкова И.А.
Перевод: Эсетова А.М.**

Адрес редакции:

367015, РД, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «Дагестанский
государственный технический университет»

Тел./факс(8722)623715

(8722)623964

E-mail: vestnik.dgtu@mail.ru Website: <http://vestnik.dgtu.ru>

**Layout: Krasikova A.V., Popkova I.A.
Translation: Esetova A.M.**

Editorial and Publisher address: 70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367015, Daghestan, Russia.

FSBEE HE «DSTU»

Tel./fax (8722)623715

(8722)623964

«БЕСПЛАТНО»

Подписано в печать 31.03.2026 г. Сдано в печать 31.03.2026 г.

Формат 60x84 ¹/₈. Гарнитура «Times». Бумага офсетная

Тираж 500. Усл. п.л. 30.46 Уч. изд.л. 33.74

Заказ № 1304

Отпечатано в типографии ИП Копыльцов П.И.

394052, Воронежская область, г. Воронеж, ул. Маршала Неделина, д. 27, кв. 56.

Тел.: 89507656959. E-mail: Kopyltsow_Pavel@mail.ru